



Universidade de Aveiro Departamento de Física
2011

**Paulo Fernando da
Costa Antunes**

**Sensores ópticos para monitorização dinâmica de
estruturas**



**Paulo Fernando da
Costa Antunes**

**Sensores ópticos para monitorização dinâmica de
estruturas**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Engenharia Física, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Sérgio de Brito André, Professor Auxiliar Convidado do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações e do Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

Apoio financeiro da FCT e do FSE no âmbito do III Quadro Comunitário de Apoio (Bolsa de doutoramento SFRH/BD/41077/2007).

o júri

presidente

Doutor Artur da Rosa Pires
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor João de Lemos Pinto
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Aníbal Guimarães da Costa
Professor Catedrático da Universidade de Aveiro

Doutor Humberto Salazar Amorim Varum
Professor Associado com Agregação da Universidade de Aveiro

Doutor Manuel Joaquim Bastos Marques
Professor Auxiliar da Universidade do Porto

Doutor Jorge Tiago Queirós da Silva Pinto
Professor Auxiliar da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Doutor Paulo Sérgio de Brito André
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro
Investigador Auxiliar do Instituto de Telecomunicações

Doutor Luís Alberto de Almeida Ferreira
Investigador Sénior do INESC – Porto
Director Comercial da FiberSensing – Sistemas Avançados de Monitorização, S.A.

agradecimentos

O trabalho desenvolvido no âmbito desta dissertação contou, felizmente, com a contribuição de muitas pessoas, pelo que quero expressar a todas os meus mais sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus orientadores, nomeadamente Professor Doutor Paulo Sérgio de Brito André e Professor Doutor Humberto Salazar Amorim Varum, por terem aceitado o desafio de me orientarem cientificamente, pela sua permanente disponibilidade, atitude, confiança, empenho e por todos os conhecimentos transmitidos.

À Doutora Nélia Alberto pelo companheirismo, por todo o contributo que deu a este trabalho, e acima de tudo, pelo permanente apoio e disponibilidade.

Aos meus colegas Hugo Lima e Doutora Lúcia Bilro pelo companheirismo e espírito de entreajuda.

Ao Mestre Rui Travanca, ao Mestre Hugo Rodrigues, ao Mestre José Melo e à Mestre Cátia Leitão pelo apoio e disponibilidade.

Ao Doutor Roberson Assis de Oliveira pela disponibilidade e conhecimentos transmitidos.

Ao Doutor Edison Pecoraro pelo apoio na deposição do material de revestimento sobre as redes de Bragg e na implementação dos sensores de humidade relativa.

Ao Mestre Carlos Marques pela ajuda na gravação das redes de Bragg.

Ao Sr. Ivo Mateus e ao Miguel Rocha da oficina metalomecânica do Departamento de Física da Universidade de Aveiro por todo o apoio técnico e disponibilidade.

À Vodafone Portugal e Telcabo, pela disponibilidade, apoio técnico e por facilitarem a realização de algumas medidas experimentais.

Gostaria ainda de agradecer ao Instituto de Nanoestruturas, Nanomodelação e Nanofabricação, ao Departamento de Física da Universidade de Aveiro, ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e ao Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro, pelo modo como me acolheram e proporcionaram condições para realizar este trabalho.

Aos Serviços Técnicos da Universidade de Aveiro por terem facilitado a realização de testes experimentais em estruturas do Campus Universitário.

À Fundação para a Ciência e a Tecnologia, por tornar viável financeiramente a realização deste projecto.

E por fim, mas não menos importante, aos meus pais que sempre me apoiaram e encorajaram desde o primeiro momento.

A todos, o meu muito obrigado!

palavras-chave

Acelerómetros, fibra óptica, redes de Bragg em fibra óptica, sensores ópticos, monitorização dinâmica de estruturas.

resumo

O presente trabalho centra-se no desenvolvimento e aplicação de sensores de aceleração ópticos, baseados em redes de Bragg gravadas em fibras ópticas, para monitorização da integridade estrutural de estruturas de engenharia civil.

Foram implementados dois acelerómetros uniaxiais e um acelerómetro biaxial. Recorreu-se a uma ferramenta de simulação baseada no método dos elementos finitos que permitiu otimizar, sem custos de produção, as características dos sensores, nomeadamente a sua frequência de ressonância. A caracterização dos sensores foi realizada em ambiente laboratorial e a sua resposta comparada com os resultados de simulação, de modo a validar os modelos numéricos. A aplicabilidade e demonstração de conceito foram realizadas na monitorização de estruturas com testes de campo. Foi monitorizado um teste destrutivo de uma parede de adobe, construída à escala real no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, onde foram utilizados sensores estáticos e dinâmicos baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica. Foram realizadas medidas dinâmicas na ponte pedonal do Campus Universitário da Universidade de Aveiro, onde se compararam os resultados obtidos com os sensores ópticos com resultados de sensores electrónicos comerciais. O acelerómetro biaxial foi testado na monitorização de estruturas esbeltas, nomeadamente na monitorização de duas torres de telecomunicações móveis, onde se demonstrou a possibilidade da utilização de sensores ópticos na caracterização dinâmica deste tipo de estruturas. Outro tipo de estruturas de engenharia civil onde foi demonstrada a aplicabilidade dos sensores ópticos desenvolvidos na monitorização estrutural foram os reservatórios de água elevados. Foi realizada a monitorização dinâmica de um exemplo deste tipo de estruturas, localizado no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. A monitorização foi realizada recorrendo ao sensor biaxial desenvolvido e a um sismógrafo, ficando o sensor óptico instalado na estrutura de modo a permitir futuras leituras e assim a monitorização periódica da estrutura. Foi ainda desenvolvido um sensor de humidade relativa do ar, com um material sol-gel, que permitiu registar o nível de humidade relativa no interior de blocos de betão, durante um ano. Este sensor pode ser incluído numa rede de sensores multiplexados, na caracterização e monitorização da integridade estrutural de certas estruturas de engenharia civil.

keywords

Accelerometers, optical fiber, fiber Bragg gratings, optical sensors, dynamic monitoring of structures.

abstract

The present work focuses on the development and application of acceleration optical sensors, based on fiber Bragg gratings written on optical fibers, for structural health monitoring of civil engineering structures.

Two uniaxial accelerometers and one biaxial accelerometer have been implemented. A simulation tool based on the finite element method was used, which allows to optimize, without production costs, the characteristics of the sensors, including its natural frequency. The sensors characterization was performed in laboratory environment and their response compared with simulation results, in order to validate the numerical models. The applicability and proof of concept were done in the monitoring of structures with field tests. A destructive test on an adobe wall, held at the Department of Civil Engineering at the University of Aveiro, was monitored using static and dynamic sensors based on fiber Bragg gratings. Dynamic measurements were carried out on a footbridge at the University Campus of the University of Aveiro, where the optical sensors results obtained were compared with the results obtained with a traditional electronic sensors. The biaxial accelerometer was used on the monitoring of high slender structures, namely the monitoring of two mobile telecommunications towers, where the possibility of using optical sensors on the dynamic characterization of such structures was demonstrated. Another type of civil engineering structures where the applicability of optical sensors in structural monitoring was demonstrated were elevated water reservoirs. The dynamic monitoring of an example of such structures, located on the Campus of the University of Aveiro was done. The monitoring was performed using the developed optical biaxial accelerometer and a seismograph, being the optical sensor permanently installed in the structure to allow future and periodic monitoring of the structure. Moreover, a relative humidity sensor was developed, with a sol-gel material, which allows the monitoring of the relative humidity inside concrete blocks over a time period of a year. This sensor can be included in multiplexed networks of sensors, on the characterization and structural health monitoring of certain civil engineering structures.

Lista de símbolos e constantes

A	Amplitude
α	Ângulo de incidência
α_0	Ângulo inicial
α_i	Ângulo de inclinação
α_A	Coefficiente de expansão térmica
α_n	Coefficiente termo-óptico
Δl	Perturbação mecânica
$\Delta \lambda$	Variação diferencial de comprimentos de onda
$\Delta \lambda_0$	Variação do valor inicial de comprimento de onda
$\Delta \lambda_B$	Variação no comprimento de onda de Bragg
Δn	Amplitude de modulação do índice de refração
$\delta n_{eff}(z)$	Variação do índice de refração do modo guiado de uma fibra ao longo do eixo longitudinal
ΔT	Variação de temperatura
$\overline{\delta n_{eff}}$	Variação do valor médio da modulação do índice de refração
ε_z	Elongação relativa segundo o eixo z
$\phi(z)$	Variação do período ao longo da rede
G	Aceleração da gravidade ($\approx 9.80665 \text{ m/s}^2$)
HR_A	Humidade relativa medida com o sensor A
HR_B	Humidade relativa medida com o sensor B
Λ	Período de modulação do índice de refração
λ_B	Comprimento de onda de Bragg
Λ_{MF}	Período das depressões da máscara de fase
λ_{UV}	Comprimento de onda da radiação do sinal ultravioleta
n_{eff}	Índice de refração efectivo da fibra óptica
p_{11}	Constante do tensor fotoelástico
p_{12}	Constante do tensor fotoelástico
p_e	Constante fotoelástica efectiva
\vec{P}	Peso
\vec{P}_x	Peso, componente segundo o eixo x

\vec{P}_z	Peso, componente segundo o eixo z
$S_{\Delta l}$	Sensibilidade à deformação da rede de Bragg
S_T	Sensibilidade térmica da rede de Bragg
T	Temperatura
ν	Coeficiente de Poisson
w	Período do sinal
ξ	Visibilidade das franjas gravadas

Glossário de acrónimos

ADC	Analog to Digital Converter	Conversor analógico para digital
ASE	Amplified Spontaneous Emission	Emissão espontânea amplificada
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer	Polímero reforçado com fibra de carbono
DSS	Decision Support Systems	Sistemas de suporte à decisão
FBG	Fiber Bragg Grating	Rede de Bragg em fibra óptica
FFT	Fast Fourier Transform	Transformada rápida de Fourier
GPS	Global Positioning System	Sistema de posicionamento global
HR	Relative Humidity	Humidade relativa
LPG	Long Period Grating	Rede de período longo
LVDT	Linear Variable Differential Transformer	Sensor de medição de deslocamento linear diferencial
MEMS	MicroElectroMechanical System	Sistema micro-electromecânico
MHM	Material Health Monitoring	Monitorização da integridade material
NDE	Non-Destructive Evaluation	Avaliação não-destrutiva
NDI	Non-Destructive Inspection	Inspecção não-destrutiva
NDT	Non-Destructive Testing	Ensaios não-destrutivos
PMMA	Poly(Methyl MethAcrylate)	Polimetilmetacrilato
PVA	PolyVinyl Alcohol	Álcool polivinílico
RAM	Random Access Memory	Memória de acesso aleatório
SHM	Structural Health Monitoring	Monitorização da integridade estrutural
TDM	Time Division Multiplexing	Multiplexagem por divisão temporal
TEC	Thermo Electrical Controller	Controlador termo eléctrico

UV	UltraViolet	Ultravioleta
WDM	Wavelength Division Multiplexing	Multiplexagem por divisão espectral
WASHMS	Wind And Structural Health Monitoring System	Sistema de monitorização da integridade estrutural

o júri

agradecimentos

resumo

abstract

Lista de símbolos e constantes

Glossário de acrónimos

Índice

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Enquadramento, motivação e objectivos	1
1.2 Estado actual da tecnologia	3
1.3 Estrutura da tese	11
1.4 Principais contribuições	13
1.5 Referências	13
 Capítulo 2 – Redes de Bragg gravadas em fibra óptica	 19
2.1 Introdução	19
2.2 Redes de Bragg	21
2.3 Processos de gravação de redes de Bragg	22
2.4 Sensibilidade das redes de Bragg a perturbações externas	26
2.5 Caracterização de redes de Bragg	28
2.6 Redes de Bragg como sensores	30
2.7 Referências	35
 Capítulo 3 – Monitorização da integridade estrutural	 41
3.1 Introdução	41
3.2 Evolução da monitorização da integridade estrutural	42
3.3 Testes de campo	44
3.4 Parâmetros a monitorizar	46

3.5	Monitorização estrutural e ensaios não-destrutivos	49
3.6	Modelos numéricos e sistemas SHM	50
3.7	Sistemas de suporte à decisão	51
3.8	Referências	51
Capítulo 4 – Acelerómetros implementados		55
4.1	Introdução	55
4.2	Acelerómetro V1	55
4.2.1	Simulação	58
4.3	Acelerómetro V2	60
4.3.1	Simulação	60
4.3.2	Implementação final e caracterização experimental	62
4.4	Acelerómetro V3	66
4.4.1	Descrição do sensor	66
4.4.2	Simulação	68
4.4.3	Implementação final e caracterização experimental	70
4.4.4	Aplicação de teste	72
4.5	Acelerómetro biaxial	74
4.5.1	Descrição do sensor	74
4.5.2	Simulação	77
4.5.3	Implementação final e caracterização experimental	78
4.5.4	Inclinómetro	83
4.6	Conclusões	85
4.7	Referências	85
Capítulo 5 – Monitorização do ensaio de uma parede de adobe com sensores ópticos		87
5.1	Introdução	87
5.2	Descrição da implementação experimental	88
5.3	Resultados	93
5.3.1	Ensaio estático	93
5.3.2	Ensaio dinâmico	101
5.4	Frequência própria da parede após reparação e reforço	105
5.5	Conclusões	107
5.6	Referências	108

Capítulo 6 – Monitorização do comportamento dinâmico de uma ponte pedonal	109
6.1 Introdução	109
6.2 Descrição da ponte pedonal estudada	110
6.3 Determinação das frequências próprias verticais	111
6.4 Determinação das frequências próprias transversais e longitudinais	115
6.5 Evolução das frequências próprias da estrutura	121
6.6 Conclusões	123
6.7 Referências	123
 Capítulo 7 – Monitorização do comportamento dinâmico de torres	
de radiocomunicações	125
7.1 Introdução	125
7.2 Descrição das estruturas estudadas	126
7.3 Montagem experimental	128
7.4 Determinação das frequências próprias por excitação externa	130
7.5 Determinação das frequências próprias com excitação ambiente	133
7.6 Comparação do valor das frequências próprias das torres com valores obtidos através de modelos numéricos	135
7.7 Conclusões	136
7.8 Referências	137
 Capítulo 8 – Monitorização do comportamento dinâmico de um reservatório de água	
elevado	139
8.1 Introdução	139
8.2 Descrição da estrutura estudada e instalação do sensor	140
8.3 Determinação das frequências próprias	141
8.4 Determinação das frequências próprias com excitação ambiente	145
8.5 Conclusões	147
 Capítulo 9 – Sensor de humidade relativa	149
9.1 Introdução	149
9.2 Estado actual da tecnologia	150
9.3 Descrição do sensor implementado	151

9.4	Caracterização do sensor implementado	153
9.5	Aplicação do sensor implementado	159
9.6	Conclusões	161
9.7	Referências	162
Capítulo 10 – Conclusões e trabalho futuro		163
10.1	Conclusões	163
10.2	Sugestões de trabalho futuro	166
Apêndice A – Patentes, capítulos de livro, publicações e comunicações resultantes do trabalho desenvolvido		169
A.1	Patentes	169
A.2	Capítulos de livro	170
A.3	Publicações	170
A.4	Comunicações	172

Capítulo 1

Introdução

1.1 ENQUADRAMENTO, MOTIVAÇÃO E OBJECTIVOS

Pontes, barragens, torres, aviões, navios, entre outros, são estruturas complexas construídas essencialmente para o bem-estar da sociedade. Estas estruturas são muitas vezes submetidas a graves agressões do meio ambiente e cargas severas, resultando na degradação estrutural e eventualmente comprometendo a sua segurança. Por todo o mundo, grandes catástrofes naturais, como terremotos ou furacões, têm ocorrido nas últimas décadas, produzindo milhares de vítimas e uma considerável perda económica, devido ao colapso ou danos severos produzidos nas estruturas. Como tal, a necessidade de identificar danos estruturais e monitorizar a sua evolução impõe o desenvolvimento de técnicas de monitorização, que podem constituir-se como ferramentas úteis para aplicações em infra-estruturas de engenharia civil, mecânica, aeronáutica, plataformas petrolíferas, etc. A monitorização estrutural é suportada por dados relacionados com a resposta da estrutura, recolhidos por uma rede de sensores, que fornecem indicadores sobre eventuais danos ou anomalias na estrutura que podem condicionar a sua integridade e desempenho. Os dados são obtidos em tempo real, podendo ser registado um grupo alargado de

parâmetros, incluindo mudanças de propriedades físicas, químicas ou eléctricas, corrosão e fadiga. Esses parâmetros estão relacionados com propriedades físicas da estrutura, tais como deformação, tensão, aceleração ou danos. Uma abordagem para implementar estratégias de monitorização estrutural é baseada na análise de vibrações estruturais induzidas pelo impacto de forças impulsivas ou cíclicas exteriores ou acções ambientais, como vento ou tráfego. As frequências próprias das estruturas são proporcionais à sua rigidez, e muitas vezes a diminuição do seu valor é entendida como um indicador da evolução dos danos físicos [1] .

Para o estudo da segurança e durabilidade das estruturas, é vantajoso explorar as tecnologias de detecção para identificar danos estruturais e até programar a sua manutenção. A monitorização estrutural oferece um novo paradigma para avaliar e acompanhar a evolução de parâmetros que caracterizam uma estrutura, combinando sensores e sistemas de monitorização com algoritmos de identificação de danos, e de análise de segurança e durabilidade das estruturas. Uma das mais promissoras tecnologias de detecção para este fim é baseada em sensores de fibra óptica, especificamente sensores baseados em redes de Bragg [1]. O uso destes dispositivos na monitorização estrutural tem aumentado significativamente nos últimos anos, devido às inúmeras vantagens sobre as soluções convencionais de monitorização.

Em muitas aplicações, a monitorização estrutural requer a análise dos parâmetros modais da estrutura, obtidos a partir de medições de aceleração, o que só pode ser alcançado empregando acelerómetros de alta sensibilidade e baixo ruído. Apesar dos acelerómetros de tecnologia electrónica se encontrarem profundamente desenvolvidos, os acelerómetros baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica (FBG) são potencialmente mais sensíveis, decorrente da melhor relação sinal-ruído. Essas características são importantes para a vigilância da integridade e desempenho estrutural, que requer acelerómetros de elevada sensibilidade, com a capacidade de medirem vibrações de baixa amplitude, resultantes de causas ambientais associadas à acção do vento ou tráfego de rodovia ferroviária.

No presente trabalho pretendeu-se desenvolver, implementar e testar sensores ópticos de aceleração, capazes de medirem acelerações, com possível utilização na monitorização estrutural. Pretendeu-se ainda utilizar ferramentas de simulação de elementos finitos que permitissem prever as características de várias configurações de sensores ópticos, sem custos de produção. Os modelos de simulação representam uma ferramenta indispensável no desenho e caracterização de sensores avançados, minimizando o tempo de produção, bem como os custos associados. Os sensores implementados são baseados em tecnologia de FBGs, permitindo a sua inclusão em

sistemas multiplexados, tirando partido da sua potencialidade de implementação a larga escala. Pretendeu-se também desenvolver e implementar sensores de deslocamento relativo e de humidade relativa do ar (HR), baseados em redes de Bragg, com possível aplicação em redes de sensores multiplexados de sistemas de monitorização estrutural.

1.2 ESTADO ACTUAL DA TECNOLOGIA

Actualmente, os projectistas, construtores e as entidades responsáveis pela exploração das infra-estruturas e outras estruturas de engenharia civil, em particular as de maiores dimensões, tais como pontes, viadutos, torres e túneis, deparam-se com o desafio de introduzir nas obras os recentes desenvolvimentos tecnológicos relativos à monitorização estrutural. Neste momento o estado da tecnologia impõe uma nova abordagem, com recurso a novos sistemas de monitorização estrutural e sistemas de análise e gestão da segurança estrutural. Estes sistemas têm como base a instalação de vários tipos de sensores, electrónicos e/ou ópticos, com sistemas automáticos de aquisição de dados, associados a sistemas de decisão e gestão. Estes têm a capacidade de, em contínuo, reportar à entidade responsável o estado de integridade e de segurança da obra em questão. A rede de sensores pode ser instalada durante a fase de construção ou na fase de exploração, e permite uma gestão adequada de recursos, nomeadamente na manutenção da obra, manifestando-se numa economia de soluções e maior rigor no controlo da durabilidade e segurança da estrutura.

Os sensores baseados em redes de Bragg tiram partido das propriedades da fibra óptica, ou seja, baixa perda de transmissão, imunidade a interferências electromagnéticas, isolamento eléctrico e reduzido peso e volume. Essas características tornam-os atraentes para o uso em ambientes hostis, onde os sensores eléctricos podem até representar perigo com risco de inflamação. Além disso, as vantagens intrínsecas da FBG também devem ser tidas em consideração. Em particular, o reduzido ruído resultante da codificação da informação no domínio espectral, e a possibilidade de multiplexar um elevado número de sensores baseados em FGBs no mesmo cabo de fibra óptica, reduzindo desta forma a necessidade dos múltiplos e pesados cabos usados nos sensores tradicionais [2, 3].

Actualmente, a principal vantagem dos sensores tradicionais, quando comparados com os sensores ópticos é o seu preço unitário e a baixa complexidade dos sistemas de interrogação. No entanto, num futuro próximo, devido à maturidade da produção de FBGs e à redução de custos

para os sistemas de interrogação resultante da sua massificação, a tecnologia óptica será amplamente comercializada para uma grande variedade de aplicações, como a monitorização estrutural. Em grandes infra-estruturas, onde um elevado número de diferentes tipos de sensores é necessário, a utilização de vários sensores FBG multiplexados é já uma solução eficaz e economicamente viável para a medição simultânea de parâmetros estáticos e dinâmicos em vários pontos de controlo.

As primeiras aplicações de redes de Bragg como sensores permitiram medir tensões e temperatura, porém com o contínuo desenvolvimento da tecnologia, novos sensores e aplicações têm vindo a ser relatados regularmente pela comunidade científica, sendo uma área de estudo em constante desenvolvimento. Actualmente, os sensores de Bragg em fibra óptica podem medir aceleração, tensão, temperatura, pressão, humidade relativa, inclinação, deslocamentos relativos, pH, índice de refração, entre outros parâmetros, com vantagens relativamente à tecnologia electrónica tradicional. Uma breve revisão do estado da tecnologia e dos sensores para os parâmetros de maior interesse na monitorização estrutural é aqui apresentada.

Os acelerómetros são dispositivos essenciais na detecção de alterações nas propriedades dinâmicas das infra-estruturas, incluindo edifícios, barragens, pontes e túneis. Nos últimos anos, o número de acelerómetros de fibra óptica propostos na literatura aumentou consideravelmente. A configuração dos acelerómetros baseados em FBGs é diversa, porém, de uma forma simplista, é baseada num sistema massa-mola. Normalmente, os acelerómetros baseados em FBGs têm como base um *cantilever*, uma massa inercial e uma fibra óptica com a FBG que liga o suporte do *cantilever* à massa inercial, funcionando como um sistema de massa-mola. Assim, na presença de uma aceleração externa, a massa inercial desloca-se e provoca uma tensão na FBG. Esta tensão induz uma alteração nas propriedades espectrais da rede de Bragg, a partir da qual pode ser aferido o valor da aceleração externa.

Como referido anteriormente, vários exemplos podem ser encontrados na literatura, como por exemplo na referência [4], onde foi descrita uma estrutura com um grau de liberdade constituída por uma massa inercial sobre uma camada de material, com propriedades elásticas adequadas (uralite), que contém a rede de Bragg. Este sistema está assente num suporte rígido de alumínio, como se mostra na figura 1.1. Quando submetido a uma aceleração externa, o material deforma-se por acção da massa inercial, provocando uma compressão ou expansão da rede de Bragg, resultando na alteração do comprimento de onda reflectido. Com essa abordagem o sinal mínimo detectável foi de ≈ 1 mG.

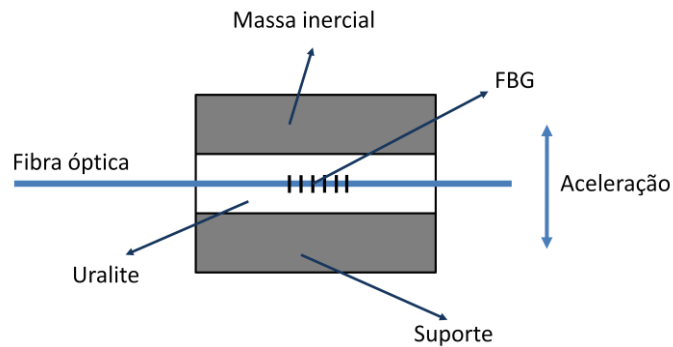


Figura 1.1: Esquema do acelerómetro uniaxial proposto em [4].

Todd *et al.* propuseram um acelerómetro similar ao desenvolvido em [4], porém utilizaram uma massa hexagonal soldada entre duas placas finas metálicas e paralelas (figura 1.2) [5]. Como a FBG é apenas fixa à superfície inferior da placa inferior e não é embebida num material, como acontece em [4], o risco de indução de tensão transversal é menor. Este dispositivo possui diversas características desejáveis num acelerómetro, incluindo boa sensibilidade à aceleração ($2 - 12.5 \mu\epsilon/G$), alta frequência de ressonância (na ordem de 1 kHz) e baixo ruído ($\approx 1 \text{ mG}/\sqrt{\text{Hz}}$, a aproximadamente 1 Hz).

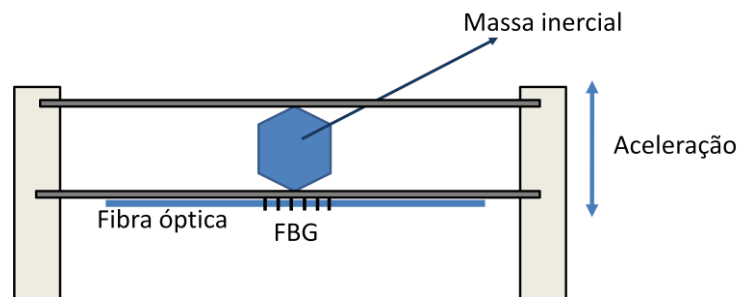


Figura 1.2: Esquema do acelerómetro proposto em [5].

No caso dos acelerómetros relatados anteriormente, a sensibilidade térmica é problemática, pois a FBG responde simultaneamente a variações de temperatura e de deformação. A adição de um regime de compensação de temperatura irá aumentar o custo do sistema. No entanto, a monitorização deste parâmetro também é essencial em algumas aplicações.

Zhu *et al.* desenvolveram um acelerómetro baseado em FBGs, insensível a variações de temperatura, sem nenhum componente adicional [6]. Estes investigadores fixaram uma FBG a um *cantilever* rectangular em aço inoxidável, com uma massa inercial no topo, como se mostra na figura 1.3. Quando uma aceleração externa é induzida, a tensão resultante varia linearmente ao

longo da rede de Bragg. A rede de Bragg inicial, antes de solicitada, apresenta um período uniforme, no entanto quando sujeita a tensão por movimentos da massa inercial torna-se numa rede aperiódica. A aceleração é medida por detecção da potência óptica reflectida na rede. Como o fotodetector recolhe a energia total reflectida, uma mudança de comprimento de onda de Bragg causada por variações térmicas não vai influenciar os resultados, sendo assim o sensor insensível à temperatura. Com a abordagem proposta, pode ser detectada uma gama de acelerações até 8 G. Como a informação não está codificada no comprimento de onda, o sistema de detecção torna-se mais económico, no entanto descarta a possibilidade de multiplexagem que é uma das características mais atractivas das FBGs.

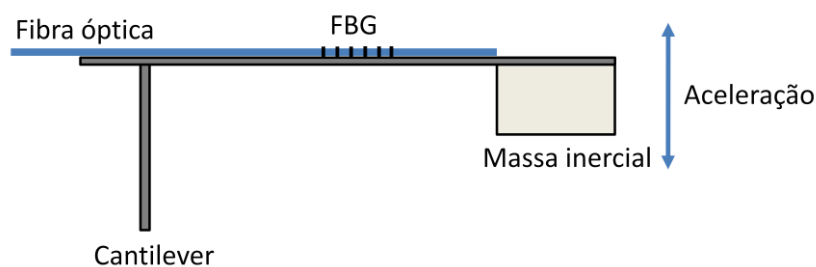


Figura 1.3: Esquema do acelerómetro proposto em [6].

O acelerómetro descrito em [7] utiliza uma rede de Bragg colada numa direcção oblíqua, formando um triângulo rectângulo com o eixo do *cantilever*. A aplicação de uma aceleração provoca uma variação da curvatura de flexão ao longo do comprimento do *cantilever*. Por conseguinte, a FBG passa a ser aperiódica e os valores da aceleração são dados pela largura de banda do espectro de reflexão e da potência óptica reflectida pela rede.

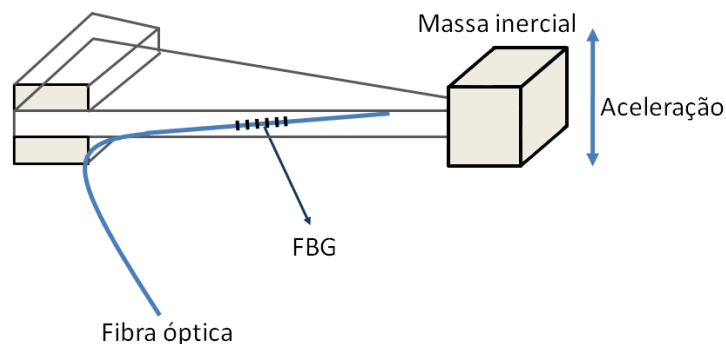


Figura 1.4: Esquema do acelerómetro proposto em [7].

Os acelerómetros uniaxiais descritos anteriormente constituem-se apenas como alguns exemplos encontrados na literatura, no entanto existe um número elevado e uma grande variedade de

sensores uniaxiais reportados, como por exemplo nas referências [8-11]. Para além de publicações em artigos científicos encontram-se também diversas patentes publicadas relativas a acelerómetros de fibra óptica baseados em redes de Bragg. Seguidamente apresentam-se alguns exemplos.

A patente US7137299 B2 descreve um acelerómetro uniaxial que permite compensar variações de temperatura ambiente e reduzir o efeito de eixos cruzados, no entanto a montagem é de elevada complexidade, uma vez que envolve a utilização de várias molas de suporte da massa inercial.

A patente US6955085 B2 propõe um acelerómetro que utiliza redes de Bragg como elemento sensor de um sistema em que a massa inercial exerce uma força de compressão sobre a fibra óptica, provocando um alongamento longitudinal da fibra com a rede de Bragg. Este sistema permite também compensar os efeitos de eixos cruzados, no entanto a complexidade da montagem revela-se como uma desvantagem. A patente compreende ainda um sistema triaxial em que são utilizados três acelerómetros uniaxiais colocados em direcções ortogonais entre si.

As patentes JP2005030796 (A) e JP2000230935 (A) descrevem acelerómetros uniaxiais, que apesar da sua configuração simples, mostram-se sensíveis a efeitos de eixo cruzado, bem como a efeitos de variação da temperatura ambiente.

A patente WO02063248A2 descreve um acelerómetro óptico de elevada sensibilidade, apropriado para aplicações em ambientes hostis, tais como perfurações petrolíferas. No entanto, apesar da sua capacidade de multiplexagem, que permite conjugar acelerómetros em várias direcções, o acelerómetro é uniaxial e não contempla a compensação de flutuações da temperatura ambiente.

Os dispositivos descritos anteriormente permitem apenas determinar a aceleração segundo uma direcção. No entanto, algumas aplicações requerem o registo da aceleração em duas ou três direcções independentes. A solução mais comum para esta finalidade consiste na utilização de acelerómetros individuais uniaxiais para medir a vibração em cada direcção. A complexidade do sistema, e também o seu custo, aumentam com este procedimento. Na literatura são escassos os acelerómetros descritos para a monitorização multidireccional. No entanto, em 2002, Morikawa *et al.* demonstraram um acelerómetro triaxial baseado em FBGs, insensível a variações de temperatura, com base numa massa inercial e seis redes de Bragg, trabalhando como elementos de mola [12]. A aceleração em cada direcção é monitorizada por uma fibra contendo duas redes de Bragg, para a compensação dos efeitos da temperatura. Embora os autores tenham

proposto um sensor triaxial, apenas uma solução uniaxial foi implementada. Em 2008, Fender *et al.* propuseram um acelerómetro de dois eixos, insensível à temperatura, construído com uma fibra que funcionava como *cantilever* [13]. Este esquema é baseado numa fibra óptica com quatro núcleos, cada um contendo uma FBG. A aceleração externa induz uma curvatura na fibra *cantilever*, podendo ser medida através da alteração do comprimento de onda de Bragg de duas redes no plano da curvatura. Em 2010, Shaoling *et al.* construíram um acelerómetro biaxial de alta sensibilidade que consiste em três fibras ópticas com redes de Bragg fixas a um suporte circular numa posição superior a estas e sobre as quais se encontra suspensa uma massa inercial. As fibras apresentam o mesmo comprimento inicial e encontram-se igualmente separadas por ângulos de 120° . Esta configuração, apresentada na figura 1.5, permite que o sensor seja insensível a variações de temperatura, tendo uma sensibilidade de $9269.23 \mu\epsilon/G$ [14].

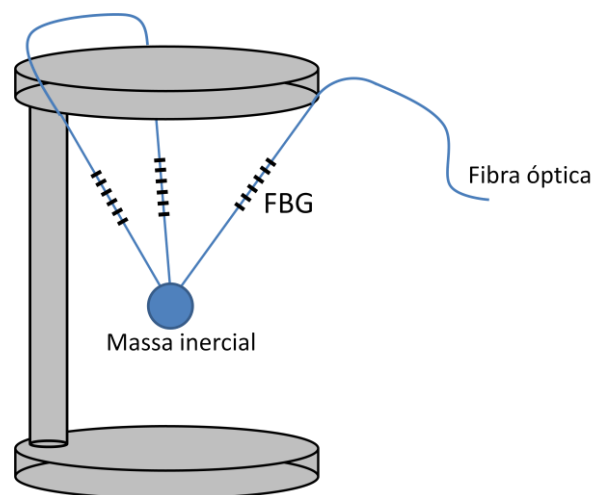


Figura 1.5: Esquema do acelerómetro proposto em [14].

Existem ainda outras patentes que propõem acelerómetros baseados em redes de Bragg para medição da aceleração em várias direcções, como é o caso da patente WO9939214A1. No entanto, é apresentado um sistema de encapsulamento relativamente complexo, com um número elevado de peças amovíveis, o que deve ser evitado em sensores deste tipo. O elevado número de peças amovíveis potencia o aparecimento de vibrações com frequências parasitas não desejadas na resposta em frequência registada no dispositivo. Por outro lado, o sistema proposto por esta patente não contempla qualquer compensação para as variações da temperatura ambiente.

A análise de tensões em pontos particulares de estruturas de engenharia civil é essencial para controlar a sua segurança. Usualmente a manutenção de estruturas depende de inspecções

visuais programadas, eventualmente combinadas com dados registados em sensores de monitorização de danos. No entanto, essas rotinas de manutenção são dispendiosas, a precisão da inspecção visual é limitada, e os sensores tradicionais nem sempre são adequados para as exigentes condições a que estão sujeitos. Os sistemas de monitorização estrutural tornaram-se uma ferramenta útil na análise da estabilidade das estruturas e na identificação dos limites de segurança em projecto de estruturas semelhantes. Neste contexto, os sensores de FBG demonstraram ser adequados, como ferramentas de baixo custo, para realizar monitorização estrutural, desde a sua utilização em plataformas petrolíferas recentemente constituídas, onde os sensores podem ser embutidos na estrutura durante a sua construção, até edifícios antigos reabilitados, onde os sensores podem facilmente ser ligados às superfícies da estrutura.

Os sensores de tensão baseados em FBGs podem ser aplicados a estruturas recentes, como é exemplo a ponte Tsing Ma, em Hong Kong [15], ou em edifícios históricos, como é o caso da Igreja da Santa Casa da Misericórdia de Aveiro, em Portugal [16]. Em certas situações, os sensores podem também ser embutidos no betão, a fim de serem medidas tensões e cargas durante a construção, e para controlar a evolução das tensões estruturais durante a sua vida útil, tal como Kister *et al.* relatam para um edifício de 13 andares em Bankside, Londres, Reino Unido [17]. Neste edifício foram instalados sensores FBG nas fundações, monitorizando o processo de cura do betão e a evolução da carga durante a construção dos vários andares.

Actualmente, a ponte Tsing Ma é a maior ponte suspensa do mundo, com 1377 m numa configuração de dois níveis. Nesta ponte foi utilizado um sistema de monitorização estrutural denominado WASHMS (Wind and Structural Health Monitoring System). Em 2006, Chan *et al.* publicaram os resultados do seu trabalho comparando o desempenho de um conjunto de sensores de tensão baseados em FBGs com o sistema WASHMS existente [15]. Os testes foram realizados em três locais específicos: nos cabos de suspensão, nos apoios e na estrutura de suporte do nível inferior. Vinte e um sensores de tensão FBG foram utilizados para monitorizar a carga do tráfego. Outros sensores FBG foram aplicados para medir a temperatura e compensar a sensibilidade cruzada, induzida por deformações de eixos ortogonais. Os resultados obtidos neste trabalho revelam que os dados recolhidos com o sistema de fibra óptica são concordantes com os dados obtidos com os extensómetros resistivos do sistema WASHMS.

Os sensores de Bragg foram também usados para monitorar a West Mill Bridge em Oxfordshire, Reino Unido, a primeira ponte na Europa reforçada com compósitos de fibra de carbono [18]. Neste trabalho foram utilizadas 40 redes de Bragg para monitorizar, remotamente e em tempo

real, as tensões em vários pontos estruturais da ponte. Este trabalho teve como objectivo providenciar uma ferramenta para avaliar remotamente a integridade estrutural da ponte, validar os princípios patentes nas normas de projecto e fornecer informações adicionais para o planeamento da sua manutenção. Outra aplicação em pontes foi realizada por Maaskant *et al.* onde foi avaliada a estabilidade a longo prazo dos cabos de pré-esforço utilizados na Beddington Trail Bridge, Canadá [19]. Foi alcançada uma precisão na medição da tensão de $40 \mu\epsilon$ e os dados, recolhidos durante um período de 19 meses, revelaram que os cabos em polímeros reforçados com fibra de carbono (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, CFRP) perderam menos 25 % do pré-esforço que tipicamente perdem os cabos de aço equivalentes, evidenciando-se como uma vantagem da utilização de CFRP em cabos de pontes.

Os sensores de fibra óptica são essencialmente utilizados em construções de engenharia civil, no entanto existem também aplicações em estruturas de barcos [20], linhas de caminho-de-ferro [21], plataformas petrolíferas [22], túneis [23] e em estudos de geodinâmica [24]. Devido à sua reduzida dimensão, peso e à capacidade de integração, os sensores FBG possuem vantagens competitivas em relação às soluções convencionais, no que diz respeito à integração em estruturas compostas inteligentes. Portanto, é natural que o número de estruturas que estão a ser monitorizadas por sensores de tensão baseados em FBGs tenha tendência a aumentar e a diversificar-se.

Os sensores de inclinação, também conhecidos como inclinómetros, são frequentemente utilizados em muitas áreas, entre elas a engenharia civil, podendo ser incluídos em sistemas de monitorização estrutural e de fundações. Em algumas aplicações, como por exemplo em torres, pilares de pontes e fundações, o controlo da inclinação é fundamental. Tradicionalmente, a medição da inclinação é realizada convertendo a inclinação da estrutura em sinais eléctricos através de um efeito magnético ou capacitivo. No entanto, nos últimos anos, vários sensores baseados em FBGs para a medição da inclinação em uma ou duas direcções, foram descritos na literatura. Um deles foi proposto por Guan *et al.* e é baseado num pêndulo vertical e dois pares de redes de Bragg, em que cada um acompanha a inclinação numa direcção [25]. Quando o sistema de suporte sofre uma inclinação, o pêndulo altera a sua posição, e a tensão induzida nas fibras a este ligadas modifica-se. O ângulo de inclinação é dado pela diferença de comprimentos de onda entre as duas redes de Bragg associadas a cada direcção, superando o problema de sensibilidade cruzada à temperatura. Com o referido sensor foram alcançadas uma precisão e resolução de, respectivamente, $\pm 0.1^\circ$ e 0.007° para um intervalo de medição de $[-9^\circ, 9^\circ]$.

No trabalho reportado na referência [26] foi aplicado um esquema semelhante, porém são utilizadas três redes de Bragg. A inclinação é obtida a partir da potência óptica reflectida pelas redes, cuja largura de banda aumenta como resultado de efeitos de tensão não uniforme a partir da inclinação. A precisão na medição do ângulo de inclinação é de $\pm 0.13^\circ$, com uma resolução de 0.02° , sendo o sensor insensível a efeitos da temperatura para a faixa de medição de $[-3^\circ, 3^\circ]$.

Recentemente, um novo inclinómetro bidireccional, insensível a variações de temperatura e baseado em FBGs, foi demonstrado com um largo intervalo de medição [27]. O sistema é composto por um pêndulo cilíndrico vertical com uma massa inercial suspensa e quatro redes de Bragg, coladas paralelamente na superfície do cilindro na direcção do seu eixo axial. Com a inclinação do sistema o cilindro forma um *cantilever* que dobra devido ao efeito da força gravítica na massa. Consequentemente, as redes sofrem diferentes valores de tensão, dependendo da direcção de flexão e curvatura do *cantilever*. O ângulo de inclinação nas duas direcções é calculado a partir da separação de comprimento de onda de dois grupos ortogonais de redes de Bragg. O sensor proposto apresentou uma precisão e resolução de, respectivamente, $\pm 0.2^\circ$ e 0.0013° , para um intervalo de medição de $[-40^\circ, 40^\circ]$. Comparando com os dois sensores anteriores [25, 26], este dispositivo apresenta uma resolução e precisão semelhantes, no entanto o intervalo de medição aumentou consideravelmente.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese encontra-se dividida em dez capítulos que descrevem as actividades referentes ao desenvolvimento de sensores ópticos baseados em redes de Bragg para monitorização estrutural, de acordo com o plano de trabalhos proposto para este doutoramento.

Neste primeiro capítulo descreve-se o contexto em que se insere o presente trabalho e os seus principais objectivos. É realizado um resumo do estado da arte no que respeita à monitorização estrutural e aos sensores ópticos essenciais para a sua implementação, com destaque para os acelerómetros baseados em redes de Bragg. São ainda apresentadas as principais contribuições do trabalho desenvolvido.

No segundo capítulo são apresentados os fundamentos teóricos das redes de Bragg gravadas em fibra óptica, os principais métodos de gravação e a sua sensibilidade a perturbações externas. Apresenta-se a caracterização de uma rede de Bragg quando exposta a variações de temperatura

e deformação, e esclarecem-se as vantagens da sua utilização como sensor, referindo algumas técnicas utilizadas que lhe facultam vantagens relativamente aos sensores tradicionais.

No terceiro capítulo apresentam-se conceitos fundamentais relativos à monitorização estrutural e à sua evolução. Evidencia-se a sua importância na aplicação em estruturas existentes, e indicam-se quais os parâmetros mais importantes a serem monitorizados. São ainda referidos alguns ensaios não-destrutivos correntemente usados nas estruturas de engenharia civil, e ainda a importância dos modelos numéricos e sistemas de suporte à decisão na análise da segurança estrutural.

No quarto capítulo são apresentados os sensores ópticos de aceleração desenvolvidos. Descrevem-se e caracterizam-se três sensores de aceleração uniaxiais e um sensor bidireccional. De modo a minimizar os custos de produção e otimizar as suas características, os sensores foram previamente simulados com uma ferramenta numérica de elementos finitos, e os resultados comparados com os provenientes da caracterização experimental.

No quinto capítulo é descrito o ensaio destrutivo de uma parede de adobe, edificada no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, à escala real, monitorizado com recurso a sensores estáticos e dinâmicos de fibra óptica. O ensaio permitiu demonstrar que é possível implementar um plano de monitorização estrutural, com medição de parâmetros estáticos e dinâmicos, com recurso a sensores ópticos baseados em redes de Bragg.

No sexto capítulo são descritos ensaios dinâmicos, não-destrutivos, numa ponte pedonal treliçada com o intuito de determinar as suas frequências próprias, associadas a modos verticais, longitudinais e transversais, com recurso a sensores ópticos de aceleração. Os resultados são comparados com resultados obtidos com recurso a sensores electrónicos tradicionais.

No sétimo capítulo é realizado um estudo não-destrutivo em duas torres de radiocomunicações para demonstrar a aplicabilidade do sensor óptico bidireccional desenvolvido em estruturas altas e esbeltas. Demonstrou-se o conceito de monitorização estrutural com excitação ambiente ao determinar as frequências próprias da estrutura quando esta é exposta à acção do vento.

No oitavo capítulo descreve-se a monitorização dinâmica de um reservatório de água elevado, situado no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. A monitorização foi realizada de modo a obterem-se as frequências associadas aos modos transversais e longitudinais da estrutura, sendo os resultados comparados com os dados obtidos simultaneamente com um sismógrafo.

No nono capítulo descreve-se o desenvolvimento de um sensor de humidade relativa com capacidade de multiplexação e passível de ser incluído numa rede de sensores de monitorização estrutural, no interior do betão. Descreve-se ainda o ensaio realizado com o referido sensor, durante cerca de um ano, no qual o sensor se encontra embebido no interior de um bloco de betão e exposto às condições ambientais.

Finalmente, no décimo capítulo apresentam-se as principais conclusões deste trabalho e algumas perspectivas de desenvolvimentos futuros.

1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

As principais contribuições do trabalho realizado nesta tese de doutoramento, no desenvolvimento de sensores ópticos para monitorização estrutural, podem resumir-se da seguinte forma:

- ✓ Desenvolvimento de um sensor uniaxial de aceleração baseado em redes de Bragg, que se caracteriza pela utilização de duas redes de Bragg, em que as redes sensoras fazem parte integrante de um sistema de interrogação de baixo custo [28];
- ✓ Desenvolvimento de um sensor biaxial óptico de aceleração e inclinómetro, baseado em redes de Bragg, com capacidade de multiplexação e insensibilidade a variações de temperatura [29];
- ✓ Demonstração da aplicabilidade de sensores ópticos na monitorização da resposta estrutural de vários tipos de estruturas, em ensaios destrutivos e não-destrutivos [30-38];
- ✓ Desenvolvimento de um sensor óptico de humidade relativa baseado em redes de Bragg, com capacidade de multiplexação e teste da sua aplicabilidade na monitorização estrutural [39].

1.5 REFERÊNCIAS

- [1] A. H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, S. W. Stinemates, B. R. Nadler and J. J. Czarnecki, "A Review of structural health monitoring literature form 1996-2001", Los Alamos National Laboratory, 2004.

- [2] H. F. Lima, R. da Silva Vicente, R. N. Nogueira, I. Abe, P. S. de Brito André, C. Fernandes, H. Rodrigues, H. Varum, H. J. Kalinowski, A. Costa and J. de Lemos Pinto, "Structural health monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, pp. 1236-1242, 2008.
- [3] Y.-J. Rao, "In-fibre Bragg grating sensors", *Measurement Science and Technology*, vol. 8, pp. 355, 1997.
- [4] T. A. Berkoff and A. D. Kersey, "Experimental demonstration of a fiber Bragg grating accelerometer", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 8, pp. 1677-1679, 1996.
- [5] M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse, and S. T. Vohra, "Flexural beam-based fiber Bragg grating accelerometers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 10, pp. 1605-1607, 1998.
- [6] Y. Zhu, P. Shum, C. Lu, B. M. Lacquet, P. L. Swart and S. J. Spammer, "Temperature-insensitive fiber Bragg grating accelerometer", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 15, pp. 1437-1439, 2003.
- [7] W. Zhou, X. Dong, C. Shen, C.-L. Zhao, C. C. Chan and P. Shum, "Temperature-independent vibration sensor with a fiber Bragg grating", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 52, pp. 2282-2285, 2010.
- [8] H. Y. Au, S. K. Khijwania, H. Y. Tam and I. Abe, "Fiber Bragg grating based accelerometer", 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, Perth, Western Australia, 2008.
- [9] J. Freal, C. Zarobila and C. Davis, "A microbend horizontal accelerometer for borehole deployment", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 5, pp. 993-996, 1987.
- [10] H. L. Ho, W. Jin, C. C. Chan, Y. Zhou and X. W. Wang, "A fiber Bragg grating sensor for static and dynamic measurands", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 96, pp. 21-24, 2002.
- [11] A. Mita and I. Yokoi, "Fiber Bragg grating accelerometer for structural health monitoring", Fifth International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC 2000), Sydney, Australia, 2000.

- [12] S. R. K. Morikawa, A. S. Ribeiro, R. D. Regazzi, L. C. G. Valente and A. M. B. Braga, "Triaxial Bragg grating accelerometer", in *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, OFS 2002*, 15th, vol.1, pp. 95-98, 2002.
- [13] A. Fender, W. N. MacPherson, R. Maier, J. S. Barton, D. S. George, R. I. Howden, G. W. Smith, B. Jones, S. McCulloch, C. Xianfeng, R. Suo, Z. Lin and I. Bennion, "Two-axis temperature-insensitive accelerometer based on multicore fiber Bragg gratings", *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, pp. 1292-1298, 2008.
- [14] H. Shaoling, D. Xinyong, Z. Shuqin, N. Kai, C. C. Chan and P. Shum, "Temperature-insensitive 2-D fiber Bragg gratings accelerometer," *International Conference on Communications and Mobile Computing (CMC)*, pp. 52-55, 2010.
- [15] T. H. T. Chan, L. Yu, H. Y. Tam, Y. Q. Ni, W. H. Chung and L. K. Cheng, "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation", *Engineering Structures*, vol. 28, pp. 648-659, 2006.
- [16] H. F. Lima, R. D. Vicente, R. N. Nogueira, I. Abe, P. S. D. André, C. Fernandes, H. Rodrigues, H. Varum, H. J. Kalinowski, A. Costa and J. L. Pinto, "Structural health monitoring of the Church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, pp. 1236-1242, 2008.
- [17] G. Kister, D. Winter, Y. Gebremichael, J. Leighton, R. A. Badcock, P. D. Tester, S. Krishnamurthy, W. J. O. Boyle, K. T. V. Grattan and G. F. Fernando, "Methodology and integrity monitoring of foundation concrete piles using Bragg grating optical fibre sensors," *Engineering Structures*, vol. 29, pp. 2048-2055, 2007.
- [18] Y. M. Gebremichael, W. Li, W. J. O. Boyle, B. T. Meggitt, K. T. V. Grattan, B. McKinley, G. F. Fernando, G. Kister, D. Winter, L. Canning and S. Luke, "Integration and assessment of fibre Bragg grating sensors in an all-fibre reinforced polymer composite road bridge", *Sensors and Actuators A-Physical*, vol. 118, pp. 78-85, 2005.
- [19] R. Maaskant, T. Alavie, R. M. Measures, G. Tadros, S. H. Rizkalla and A. GuhaThakurta, "Fiber-optic Bragg grating sensors for bridge monitoring", *Cement & Concrete Composites*, vol. 19, pp. 21-33, 1997.
- [20] M. D. Todd, J. M. Nichols, S. T. Trickey, M. Seaver, C. J. Nichols and L. N. Virgin, "Bragg grating-based fibre optic sensors in structural health monitoring", *Philosophical*

- Transactions of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, pp. 317-343, 2007.
- [21] H. Y. Tam, T. Lee, S. L. Ho, T. Haber, T. Graver and A. Mendez, "Utilization of fiber optic Bragg grating sensing systems for health monitoring in railway applications", *Structural Health Monitoring 2007: Quantification, Validation, and Implementation*, vols. 1 and 2, pp. 1824-1831, 2007.
- [22] L. Sun, H. Li and Q. Jin, "FBG sensors for the measurement of the dynamic response of offshore oil platform model", *Health monitoring and smart nondestructive evaluation of structural and biological*, San Diego, California, EUA, 2005.
- [23] J. Liu, C. Li, H. Qiu and X. Zhao, "FBG-based health monitoring for the secondary lining of Bainijing tunnel N° 3 in Kunming, China", *Boundaries of Rock Mechanics*, Taylor & Francis, pp. 781-786, 2008.
- [24] P. Ferraro and G. De Natale, "On the possible use of optical fiber Bragg gratings as strain sensors for geodynamical monitoring", *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 37, pp. 115-130, 2002.
- [25] B.-O. Guan, H.-Y. Tam and S.-Y. Liu, "Temperature-independent fiber Bragg grating tilt sensor", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 16, pp. 224-226, 2004.
- [26] X. Dong, C. Zhan, K. Hu, P. Shum, and C. C. Chan, "Temperature-insensitive tilt sensor with strain-chirped fiber Bragg gratings", *Photonics Technology Letters, IEEE*, vol. 17, pp. 2394-2396, 2005.
- [27] H. Bao, X. Dong, C. Zhao, L.-Y. Shao, C. C. Chan and P. Shum, "Temperature-insensitive FBG tilt sensor with a large measurement range", *Optics Communications*, vol. 283, pp. 968-970, 2010.
- [28] P. Antunes, H. Varum and P. André, "Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity", *Measurement*, vol. 44, pp. 55-59, 2011.
- [29] P. André, P. Antunes and H. Varum, "Acelerómetro e inclinómetro bidimensional óptico baseado em redes de difracção gravadas em fibras ópticas", 2011 (Patente Nacional Pendente).

- [30] P. Antunes, H. Lima, N. Alberto, L. Bilro, P. Pinto, A. Costa, H. Rodrigues, J. L. Pinto, R. Nogueira, H. Varum and P. S. André, "Optical sensors based on FBG for structural health monitoring", *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, vol. 1, S. C. Mukhopadhyay, Springer-Verlag, 2011.
- [31] P. Antunes, H. Lima, H. Varum and P. André, "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study", *Measurement*, 2011 (Submetido).
- [32] P. Antunes, R. Travanca, H. Varum and P. André, "Dynamic characterization of a radio communication tower with a FBG based accelerometer", *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim*, Sydney, Australia, 2011.
- [33] P. Antunes, R. Travanca, H. Varum and P. André, "Dynamic monitoring of a mobile telecommunications tower exposed to natural loading with a FBG biaxial accelerometer", 16th Opto-Electronics and Communications Conference - OECC2011, Kaohsiung, Taiwan, 2011.
- [34] P. Antunes, H. Varum and P. S. André, "Dynamic monitorization of structures with optical sensors", *EURODYN 2011 - Eighth International Conference on Structural Dynamics*, Leuven, Belgium, 2011.
- [35] P. Antunes, R. Travanca, H. Varum and P. André, "Dynamic monitoring of a mobile telecommunications tower with a bi axial optical FBG accelerometer", *International Conference on Applications of Optics and Photonics - AOP2011*, Braga, Portugal, 2011.
- [36] P. Antunes, H. Varum and P. André, "Optical FBG sensors for static structural health monitoring", *EASEC12 - Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*, Hong Kong, 2011.
- [37] P. Antunes, H. Lima, H. Varum and P. André, "Static and dynamic structural monitoring based on optical fiber sensors", 12th *International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Munich, Germany, 2010.
- [38] P. Antunes, H. Lima, H. Varum and P. André, "Health monitoring of civil engineering infrastructures with optical fiber sensors", *SEON2010, VIII Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors*, Porto, Portugal, 2010.

- [39] P. André, H. Varum, P. Antunes, E. Pecoraro, M. R. André and L. D. Carlos, "Sensor óptico baseado em redes de difracção para monitorização do nível de humidade relativa e temperatura em estruturas de engenharia civil", 2011 (Patente Nacional Pendente).

Capítulo 2

Redes de Bragg gravadas em fibra óptica

2.1 INTRODUÇÃO

As fibras ópticas são conhecidas como meio de transmissão de dados em redes de telecomunicações, devendo-se o seu desenvolvimento, em grande parte, ao progresso dos sistemas de comunicações ópticas. Estas são constituídas por uma estrutura cilíndrica fina, o núcleo ($\approx 10\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro), rodeado por uma camada concêntrica, a bainha ($\approx 125\text{ }\mu\text{m}$ de diâmetro), com um índice de refração ligeiramente inferior. Embora as fibras ópticas tenham sido fabricadas sem revestimento desde 1920, o seu desenvolvimento só foi consolidado quando, em 1966, foi proposta a sua produção com várias camadas concêntricas de sílica [1].

As aplicações da fibra óptica não se encontram limitadas ao transporte de informação, podendo também ser utilizadas como sensores. Diversos parâmetros, tais como: temperatura, tensão, deformação, índice de refração, aceleração e humidade relativa podem ser medidos com recurso a sensores de fibra óptica, com vantagens sobre os tradicionais sensores electrónicos. Existem vários tipos de sensores de fibra óptica, sendo os principais baseados em variações da

intensidade, fase, frequência, polarização ou conteúdo espectral do sinal óptico propagado [2], sendo que uma das técnicas mais promissoras é baseada em tecnologia de redes de Bragg.

O registo de redes permanentes em fibra óptica foi demonstrado por Hill *et al.*, no *Canadian Communications Research Centre* (CRC), em 1978 [3, 4]. Hill e a sua equipa de investigadores iluminaram uma fibra óptica dopada com germânio com radiação emitida por um laser de árgon (480 nm). Algum tempo após iniciada a exposição, observaram que a intensidade do sinal reflectido aumentava de acordo com o tempo de exposição até uma situação de reflexão total. Posteriormente verificou-se que este aumento na reflectividade era resultante da formação da modulação fotoinduzida do índice de refração no núcleo da fibra óptica. Durante a década seguinte, constatou-se que a magnitude do distúrbio fotoinduzido no índice de refração era dependente do quadrado da potência óptica do laser, sugerindo que a fotossensibilidade seria um processo resultante de um fenómeno de absorção de dois fotões, mais especificamente originado pela presença de centros de germânio deficitários em oxigénio na matriz da sílica. O valor de absorção máxima ocorre para um comprimento de onda em torno de 240 nm. A presença desses centros deve-se ao processo de fabricação de fibras ópticas, durante o qual o núcleo da fibra é dopado com GeO_2 , de modo a aumentar o índice de refração na região do núcleo da fibra.

As redes de Bragg são dispositivos ópticos passivos com aplicação na área dos sensores e comunicações ópticas. As FBGs são uma modulação periódica do índice de refração do núcleo de uma fibra óptica, que quando iluminada por um sinal espectralmente largo irá reflectir selectivamente uma região espectral centrada no comprimento de onda que satisfaz a condição de Bragg de primeira ordem, sendo o restante sinal transmitido. Desta forma, o espectro reflectido por uma FBG é uma estreita faixa espectral, centrada no comprimento de onda de Bragg. A variação do comprimento de onda central do sinal reflectido é a componente a monitorizar em sensores baseados em FBGs, pois encontra-se relacionado com o parâmetro ao qual o sensor é sensível.

Os sensores baseados em redes de Bragg apresentam as vantagens inerentes à utilização da fibra óptica, tais como: peso reduzido; imunidade a interferências electromagnéticas; baixa perda de transmissão; e elevado isolamento eléctrico. Além das vantagens da fibra óptica existem também outras vantagens inerentes à própria rede de Bragg, nomeadamente: elevada relação sinal-ruído, e possibilidade de multiplexagem de vários sensores na mesma fibra óptica, evitando a múltipla cablagem exigida para os sensores electrónicos.

Neste capítulo é discutido o funcionamento das redes de Bragg em fibra óptica, destacando-se a forma como podem ser utilizadas como sensores e as suas vantagens.

2.2 REDES DE BRAGG

Devido à possibilidade de optimização das suas características espectrais, à baixa perda de inserção e ao baixo custo de implementação, as redes de Bragg apresentam-se como dispositivos adequados quer para a sua inclusão em sistemas de comunicações ópticas, quer como elementos sensores. Apesar de serem dispositivos relativamente simples, as suas características dependem de um elevado número de parâmetros controláveis, tais como: comprimento físico da modulação, amplitude de modulação e periodicidade do índice de refração, e formato de apodização da amplitude de modulação do índice de refração. Estes parâmetros permitem adequar a rede à aplicação pretendida, nomeadamente reflectividade e comprimento de onda reflectido.

Uma rede de Bragg consiste na modulação usualmente periódica longitudinal do índice de refração do núcleo da fibra óptica. O comprimento físico de uma rede de Bragg, ou da região onde existe modulação de índice, varia tipicamente desde alguns milímetros até poucos centímetros. O valor da amplitude de modulação do índice de refração, Δn , apresenta valores típicos da ordem de 10^{-4} , não ultrapassando 10^{-2} . Para uma rede de Bragg a operar na janela espectral de 1500 nm, usual nas comunicações ópticas e dispositivos sensores, a periodicidade típica da modulação é $\Lambda \approx 0.5 \mu\text{m}$ [5]. Na figura 2.1 mostra-se uma esquematização de uma rede de Bragg uniforme inscrita numa fibra óptica, bem como dos espectros típicos e da variação do índice de refração.

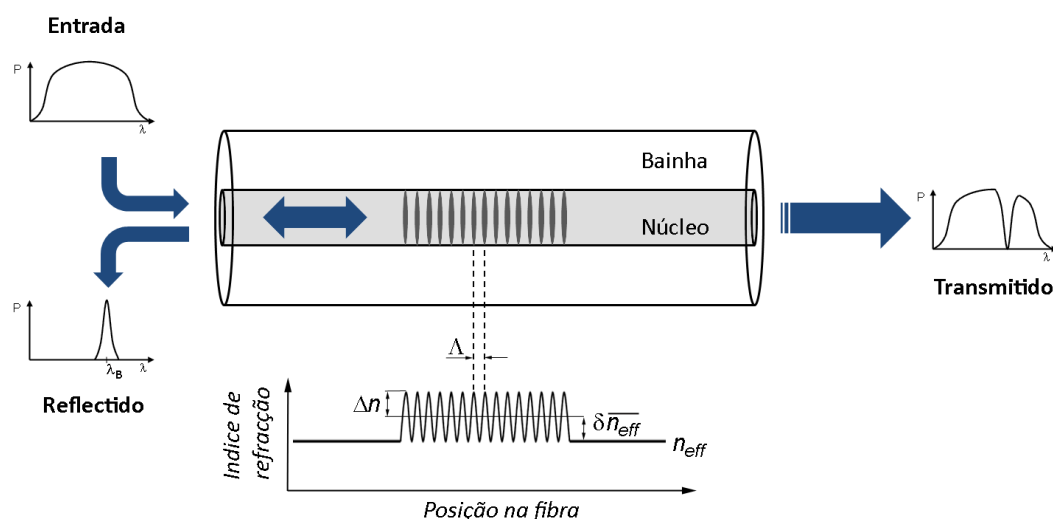


Figura 2.1: Esquema de uma rede de Bragg.

Se o comprimento de onda do campo óptico incidente não verificar a condição de Bragg, as componentes dispersas pelos planos consequentes da estrutura tornam-se progressivamente fora de fase, acabando por se anularem. No caso da condição de Bragg ser satisfeita, as contribuições dispersas por cada plano da estrutura são adicionadas construtivamente.

O comprimento de onda do modo reflectido, ou comprimento de onda de Bragg, é dado pela condição de Bragg de primeira ordem:

$$\lambda_B = 2\Lambda n_{eff} \quad (2.1)$$

onde λ_B é o comprimento de onda de Bragg central do sinal reflectido, n_{eff} é o índice de refacção efectivo da fibra óptica, e Λ o período de modulação do índice de refacção no núcleo da fibra óptica.

A perturbação periódica induzida no índice de refacção efectivo (n_{eff}) ao longo do eixo de propagação z , é dada por [6]:

$$\delta n_{eff}(z) = \overline{\delta n_{eff}}(z) \left\{ 1 + \xi(z) \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \phi(z) \right] \right\} \quad (2.2)$$

onde $\overline{\delta n_{eff}}$ representa a variação do valor médio da modulação, ξ a visibilidade das franjas gravadas (que pode assumir valores entre 0 e 1), Λ o período da rede, e $\phi(z)$ descreve a variação do período ao longo da rede, no caso de redes aperiódicas.

2.3 PROCESSOS DE GRAVAÇÃO DE REDES DE BRAGG

Uma rede de Bragg é formada pela exposição da fibra óptica a um padrão de radiação ultravioleta (UV). Para que o processo seja eficiente a fibra deverá ser fotossensível a essa radiação. As fibras ópticas padrão apresentam baixa fotossensibilidade, no entanto existem técnicas que a permitem aumentar, tais como a co-dopagem do núcleo ou o aumento da concentração de germânio. Pela sua simplicidade, uma das técnicas mais utilizadas, e que permite um aumento da fotossensibilidade em cerca de duas ordens de grandeza, é a hidrogenização da fibra óptica. Esta técnica consiste na difusão de hidrogénio no interior da fibra, resultante da exposição a pressões superiores a 100 atm, durante vários dias, seguido da gravação imediata das redes. A hidrogenização da fibra, antes da irradiação, aumenta a fotossensibilidade, permitindo a redução do tempo de exposição e o aumento da amplitude de modulação do índice de refacção. A

hidrogenização pode tornar a rede instável quando sujeita a variações de temperatura, no entanto, existem procedimentos que permitem melhorar essa estabilidade, como é o caso, por exemplo, do tratamento térmico [5].

Inicialmente, Hill utilizou um método interno de gravação, que consistia na injeção de radiação de um laser de iões de árgon no núcleo da fibra óptica. A interferência do sinal propagante com o contra-propagante, resultante da reflexão de Fresnel na face clivada da fibra óptica, formava uma onda estacionária no núcleo da fibra. Deste modo induziu-se uma modulação do índice de refração do núcleo da fibra com valores máximos correspondentes aos máximos da onda estacionária criada. Este método é pouco eficiente, com uma fraca modulação do índice de refração, podendo, no entanto, ser útil na gravação de redes com um comprimento físico elevado [7].

Existem vários processos externos que possibilitam a gravação de FBGs. Nesta tese são apenas referidos os métodos de gravação por máscara de fase e interferométrico com máscara de fase, por serem as técnicas frequentemente utilizadas na gravação das FBGs na Universidade de Aveiro.

Gravação de redes de Bragg por máscara de fase

A aplicação do método da máscara de fase é considerado como um grande passo na gravação de redes de Bragg em fibra óptica, devido à simplicidade e facilidade de gravação [8]. Uma máscara de fase é um elemento óptico de transmissão, contendo uma sequência de perturbações na superfície de um substrato de sílica. Pode ser criada através de processos holográficos ou por processos litográficos com varrimento de feixe de electrões [7]. A técnica de gravação por máscara de fase, ilustrada na figura 2.2, baseia-se na sobreposição de duas ordens de difracção do sinal produzidas pela máscara sobre o núcleo da fibra óptica, formando um padrão de interferência. As máscaras de fase mais recentes são desenhadas de modo a minimizar a ordem de difracção zero e maximizar as ordens -1 e +1, que serão utilizadas no processo.

A fibra óptica é colocada próxima à máscara de fase, para que a região do núcleo onde se pretende inscrever a rede de Bragg se encontre na região de sobreposição dos dois sinais difractados. A sobreposição dos sinais das ordens origina franjas de interferência no plano da fibra, que irão formar a FBG, com um período $\Lambda = \Lambda_{MF} / 2$, onde Λ_{MF} é o período da máscara de fase.

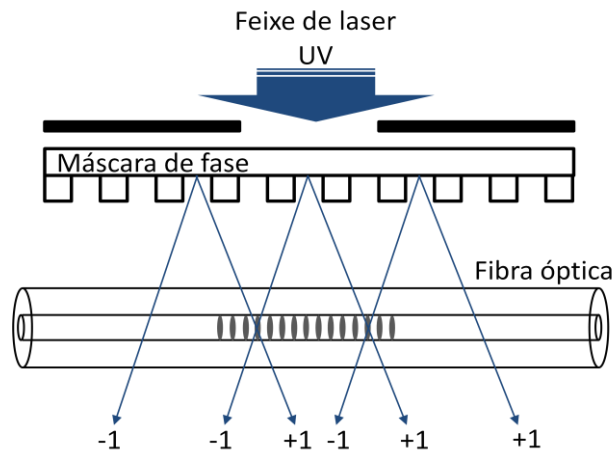


Figura 2.2: Esquemática do processo de gravação por máscara de fase.

Gravação de redes de Bragg por interferômetro com máscara de fase

Em 1989, Meltz *et al.* usaram um interferômetro por divisão de amplitude para gravar redes de Bragg em fibras ópticas [9]. Neste caso, o feixe de radiação UV é dividido em dois feixes, com amplitudes semelhantes, sendo reflectidos em espelhos laterais e recombinaos na região do núcleo da fibra, onde formam um padrão de interferência (figura 2.3). Neste processo o período das franjas de interferência formadas é dado por [7]:

$$\Lambda = \frac{\lambda_{UV}}{2\sin(\alpha)} \quad (2.3)$$

onde λ_{UV} é o comprimento de onda da radiação ultravioleta.

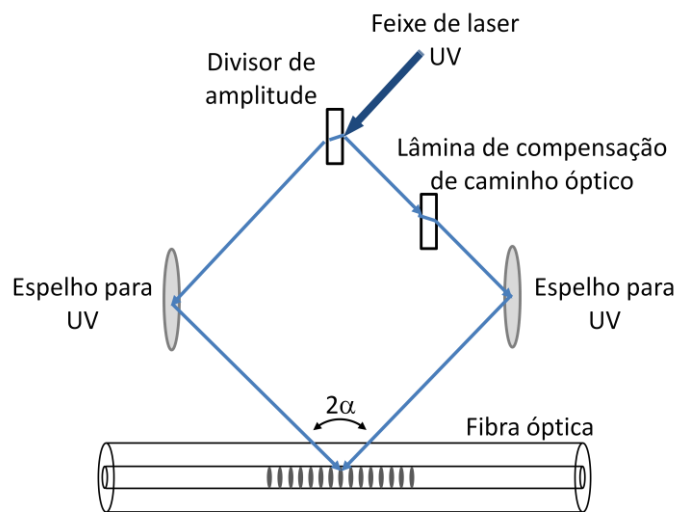


Figura 2.3: Esquemática do processo de gravação por interferômetro com divisor de amplitude.

De acordo com a expressão (2.3), verifica-se que o período da rede de Bragg pode ser alterado variando o ângulo de incidência, α , ou o comprimento de onda da radiação incidente, λ_{UV} . A escolha do comprimento de onda da radiação incidente está limitada à gama espectral para a qual a fibra óptica é fotossensível, no entanto não existe restrição para o ângulo de incidência. Esta técnica é versátil, possibilitando a gravação de redes com características distintas, no entanto é susceptível a vibrações mecânicas dos espelhos, do divisor de amplitude ou de outro componente constituinte da montagem, produzindo instabilidade no padrão de interferência.

Na gravação de redes de Bragg por interferómetro com máscara de fase a divisão do feixe de radiação incidente é realizada por uma máscara de fase. As ordens difractadas são reflectidas em espelhos laterais e reencaminhadas para a fibra óptica onde interferem formando o padrão de interferência necessário à gravação da rede [8]. Na figura 2.4 apresenta-se uma esquematização do processo.

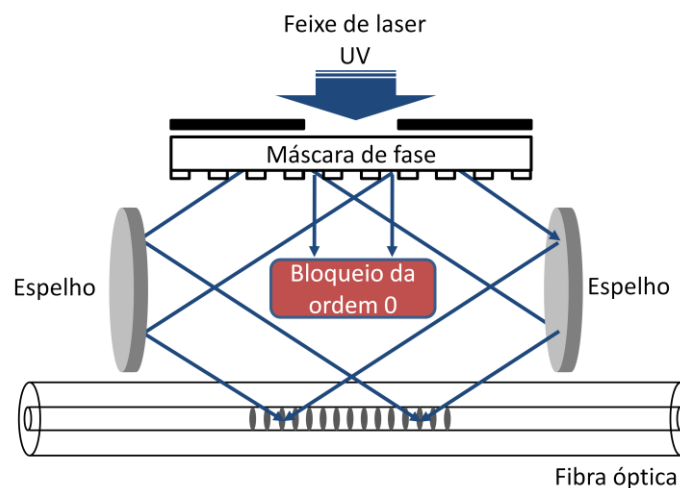


Figura 2.4: Esquematização do processo de gravação por interferómetro com máscara de fase.

O uso da máscara de fase, em vez de um simples divisor de feixe, o qual é bastante mais económico, é justificado pela simplificação do processo de alinhamento. O comprimento de onda da rede a gravar é controlado pelo ângulo de incidência das duas ordens difractadas na fibra óptica, tal como no método interferométrico, que pode ser controlado pelos espelhos laterais.

Sistema de gravação das redes de Bragg utilizadas

As FBGs usadas no âmbito deste trabalho de doutoramento foram gravadas recorrendo ao sistema implementado no Instituto de Telecomunicações – Pólo de Aveiro (IT), do qual se mostra um esquema na figura 2.5. O sistema de gravação baseia-se no método de máscara de fase.

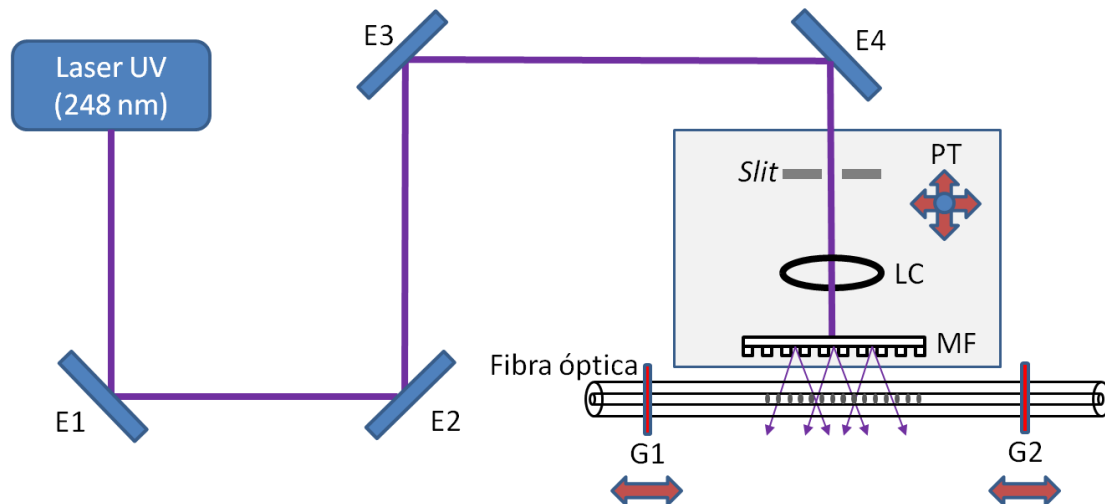


Figura 2.5: Esquemática do sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações.

A fonte de radiação UV do sistema é um laser de excímeros (KrF), pulsado (modelo BraggStar Industrial da *Coherent*), que emite com um comprimento de onda de 248 nm. Para minimizar vibrações que possam desalinhar o sistema, este encontra-se sobre uma mesa óptica de ar comprimido. O sinal emitido pelo laser é direccionado por um conjunto de espelhos (E1 a E4) para a máscara de fase (MF). Antes da máscara de fase o feixe passa por uma abertura (*slit*), ajustável de 0 a 4 mm (resolução de 1.5 μm), e por uma lente de focagem cilíndrica (LC) que permite focar o sinal na máscara de fase. A abertura, lente e máscara de fase encontram-se sobre uma plataforma de translação (PT) de três eixos, que permite alinhar o sistema e aproximar a máscara de fase da fibra óptica de modo a esta ficar localizada na zona de sobreposição das ordens de difracção da máscara de fase. A fibra óptica encontra-se fixa por duas garras magnéticas (G1 e G2). Os postes metálicos que sustentam as garras metálicas encontram-se também sobre plataformas de translação, permitindo a aplicação de pré-tensão à fibra óptica [10].

2.4 SENSIBILIDADE DAS REDES DE BRAGG A PERTURBAÇÕES EXTERNAS

A expressão de Bragg (equação (2.1)) mostra que o comprimento de Bragg depende do índice de refracção efectivo da fibra óptica e do período da rede inscrita. Ambos os parâmetros são sensíveis a variações térmicas e/ou deformações, como tal, qualquer perturbação externa que actue nestes parâmetros poderá ser quantificada pela consequente alteração no comprimento de onda de Bragg.

A consequente alteração do comprimento de onda reflectido pela rede de Bragg quando exposta a variações de temperatura, ΔT , ou a perturbações mecânicas, Δl , é dada por [7]:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T + 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial l} + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial l} \right) \Delta l \quad (2.4)$$

O efeito da temperatura no comprimento de onda reflectido é quantificado pelo primeiro termo da equação (2.4), enquanto que o segundo termo representa o efeito da perturbação mecânica.

Considerando uma rede de Bragg apenas sujeita a variações de temperatura ($\Delta l = 0$), o efeito de variações térmicas no comprimento de onda de Bragg pode ser descrito por [7]:

$$\Delta\lambda_B = S_T \Delta T \quad (2.5)$$

onde S_T é a sensibilidade térmica da rede de Bragg, dada por:

$$S_T = \lambda_B (\alpha_\Lambda + \alpha_n) \quad (2.6)$$

com,

$$\alpha_\Lambda = \frac{1}{\Lambda} \left(\frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \quad (2.7)$$

e

$$\alpha_n = \frac{1}{n_{eff}} \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \right) \quad (2.8)$$

onde α_Λ é o coeficiente de expansão térmica ($\alpha_\Lambda \approx 0.55 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a sílica dopada com germânio), e α_n o coeficiente termo-óptico ($\alpha_n \approx 8.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para a sílica dopada com germânio). É de esperar uma sensibilidade térmica de aproximadamente 13 pm/ $^\circ\text{C}$ para redes de Bragg a funcionarem na região espectral de 1550 nm [7].

Considerando a ausência de perturbações térmicas ($\Delta T = 0$), o efeito de perturbações mecânicas no comprimento de onda de Bragg pode ser descrito por [7]:

$$\Delta\lambda_B = S_\Delta \varepsilon_z \quad (2.9)$$

onde S_{Δ} é a sensibilidade à deformação segundo o eixo longitudinal, e ε_z é a elongação relativa, segundo o eixo longitudinal. A sensibilidade a perturbações mecânicas pode ser dada por:

$$S_{\Delta} = \lambda_B (1 - p_e) \quad (2.10)$$

sendo a constante fotoelástica efectiva, p_e , definida como:

$$p_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \quad (2.11)$$

onde ν representa o coeficiente de Poisson da fibra óptica e p_{11} e p_{12} as componentes do tensor fotoelástico. Para uma fibra típica dopada com germânio, os valores característicos de ν , p_{11} e p_{12} são 0.16, 0.113 e 0.252, respectivamente. Usando estes valores nas expressões anteriores, obtém-se um valor de sensibilidade à deformação de 1.2 pm por cada 1 μ de elongação relativa (1.2 pm/ $\mu\varepsilon_z$) [7].

2.5 CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE BRAGG

A caracterização de uma rede de Bragg pode ser realizada recorrendo à análise do seu espectro de reflexão e/ou de transmissão. Neste trabalho a caracterização da rede foi realizada por análise do espectro de reflexão, sendo para tal necessário conectorizar uma extremidade da fibra que contém a FBG, encontrando-se a outra livre e clivada. De modo a minimizar reflexões na extremidade livre da fibra, e minimizar o ruído de fundo, coloca-se na extremidade não conectorizada gel adaptador de índice de refração. As redes de Bragg utilizadas são uniformes, tendo sido gravadas em fibra óptica fotossensível comercial (*FiberCore* PS1250/1500), com recurso ao sistema de gravação implementado no Instituto de Telecomunicações. A fibra utilizada apresenta um núcleo co-dopado com iões de boro para aumentar a fotossensibilidade, permitindo produzir FBGs de alta reflectividade. As redes de Bragg foram caracterizadas de modo a obter-se a sensibilidade térmica e à deformação mecânica. Para isso foi utilizado um sistema de monitorização de redes de Bragg comercial, correntemente denominado por “interrogador”, modelo sm125 da *Micron Optics*. Com este adquiriu-se o comprimento de onda de Bragg para diferentes temperaturas com um valor nulo de elongação, e para diferentes valores de elongação relativa com a rede a temperatura constante.

A fibra com a rede de Bragg foi colocada sobre um módulo termoelétrico e revestida com massa térmica, de modo a uniformizar a temperatura e diminuir a resistência térmica entre a fibra e o módulo. O módulo termoelétrico é actuado por um controlador de temperatura, *ThorLabs* modelo TED 350, que contém um sensor de temperatura LM335, a partir do qual a temperatura do módulo é monitorizada.

O comprimento de onda de Bragg da rede foi medido em função da temperatura, entre -5°C e 100°C . No intervalo de -5°C a 50°C foi utilizado um passo de 5°C , e no intervalo de 50°C a 100°C um passo de 10°C . Na figura 2.6 mostra-se a variação do comprimento de onda de Bragg com a temperatura.

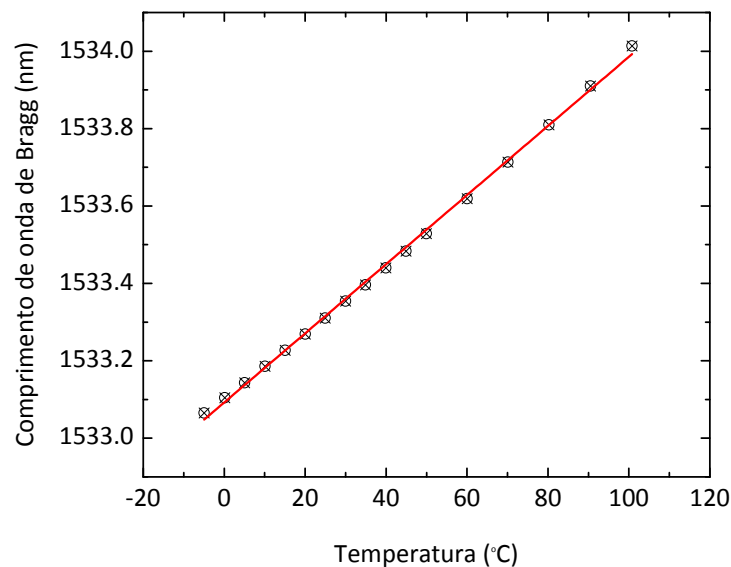


Figura 2.6: Variação do comprimento de onda de Bragg em função da temperatura e ajuste linear. Os pontos representam os dados experimentais e a linha o ajuste linear ($R^2 = 0.9987$).

A partir dos dados da figura 2.6, e por ajuste linear obteve-se a sensibilidade da FBG à temperatura, neste caso $8.93 \pm 0.08 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$. Este valor é inferior ao valor típico das fibras dopadas com germânio, no entanto trata-se de uma rede gravada em fibra fotossensível dopada com iões de boro, como tal os valores dos parâmetros termo-óptico e de expansão térmica são diferentes dos anteriormente apresentados.

Para caracterizar a deformação foi utilizada uma fibra fotossensível com uma rede de Bragg inscrita, idêntica à anterior. A fibra, à qual foi retirada o revestimento polimérico, foi colada com cianoacrilato a dois suportes, sendo um deles colocado sobre uma plataforma de translação linear controlada por um parafuso micrométrico. O comprimento de onda central reflectido pela rede

de Bragg foi monitorizado em função da tensão aplicada na fibra óptica. Na figura 2.7 mostra-se o comprimento de onda de Bragg em função da elongação relativa induzida.

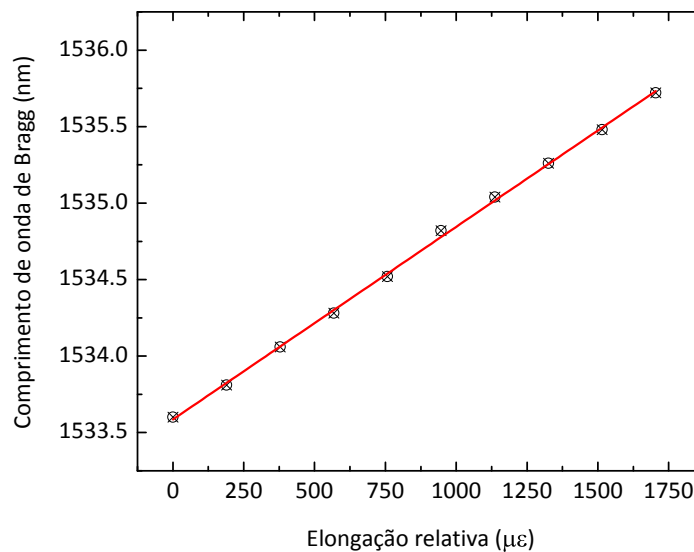


Figura 2.7: Variação do comprimento de onda de Bragg em função da deformação relativa e ajuste linear. Os pontos representam os dados experimentais e a linha o ajuste linear ($R^2 = 0.9991$).

A análise dos dados da figura 2.7 permite determinar a sensibilidade da rede de Bragg à deformação. Por ajuste linear aos dados de comprimento de onda de Bragg em função da elongação relativa obteve-se um valor de 1.26 ± 0.01 pm/ $\mu\epsilon$ para a sensibilidade à deformação. Este valor é um resultado típico de sensibilidade à deformação para uma rede de Bragg [7].

2.6 REDES DE BRAGG COMO SENSORES

Ao longo das últimas duas décadas, após o fabrico bem sucedido das primeiras FBGs, tem sido observado um intenso esforço no aumento da qualidade deste tipo de sensores. Os sensores baseados em FBGs apresentam-se como uma das mais promissoras tecnologias de sensoramento, devido às vantagens sobre os tradicionais sensores electrónicos. São parte intrínseca do cabo de fibra óptica que pode transmitir o sinal de medição ao longo de várias dezenas de quilómetros, com peso e volume reduzidos, imunidade a interferências electromagnéticas, isolamento eléctrico, possibilidade de funcionamento em muitos ambientes hostis onde os sensores convencionais falham (centrais nucleares, perfurações petrolíferas, barragens hidroeléctricas, ambientes ácidos ou húmidos, etc.) e não fazem uso de sinais eléctricos. Para além disso têm a capacidade de multiplexar vários sensores numa única fibra óptica (reduzindo assim o custo de sistemas de detecção complexos), e devido às suas reduzidas

dimensões são adequados para serem incorporados em muitos tipos de estruturas [11]. Apesar de neste trabalho a atenção estar focada em sensores com aplicação em estruturas de engenharia civil, as redes de Bragg podem ter muitas mais aplicações, tais como: engenharia aeroespacial e naval, medicina nuclear, linhas de transmissão de energia, entre outras [7, 12].

Na monitorização estrutural as redes de Bragg podem ser utilizadas para: monitorização de esforços e deformações em estruturas de betão armado, monitorização dinâmica de infra-estruturas civis, processo de cura de argamassas e betões, medidas de humidade relativa, monitorização do nível de pH, aplicações geodinâmicas, entre outras, como descrito em [11] e nas suas referências. Embora este tipo de sensores seja normalmente aplicado em medidas estáticas, podem medir simultaneamente parâmetros estáticos e dinâmicos, de onde se podem obter as frequências próprias das estruturas, através de medidas como a aceleração. As informações recolhidas por meio de medidas dinâmicas são também essenciais para calibrar modelos numéricos e para inferir sobre a integridade das estruturas, uma vez que a rigidez da estrutura global está directamente relacionada com a sua frequência própria [13, 14]. As redes de Bragg apresentam também uma elevada velocidade de resposta, apenas limitada pelo sistema de aquisição do sinal.

Multiplexação dos sensores

Uma das principais vantagens dos sensores baseados em FBGs é a capacidade de multiplexagem, que permite colocar vários tipos de sensores na mesma fibra óptica. Esta faculdade pode ser realizada por diferentes métodos, geralmente por multiplexagem temporal (*Time Division Multiplexing*, TDM) e multiplexagem espectral (*Wavelength Division Multiplexing*, WDM). No sistema TDM utiliza-se uma fonte de sinal pulsada de elevada largura espectral, e identifica-se as diferentes redes de Bragg pelo tempo necessário para o regresso do sinal reflectido na FBG ao detector. Os impulsos reflectidos nas redes mais próximas são recebidos antes dos impulsos reflectidos nas redes mais distantes. Esta técnica é usualmente utilizada em conjunto com a técnica de WDM e, caso a rede seja submetida a algum tipo de perturbação, as suas características espectrais são alteradas. Como não existe limitação espectral podem ser utilizadas redes com o mesmo comprimento de onda, assim o número de sensores na mesma fibra óptica pode atingir as 100 unidades [15]. No entanto, como os sensores podem ser inscritos no mesmo comprimento de onda, as redes devem ter baixa reflectividade para permitir que o sinal as atravessasse e incida nas redes a jusante, sendo uma desvantagem desta solução [16]. O outro método, mais usual, baseia-se na multiplexagem espectral, em que cada FBG apresenta um

comprimento de onda de Bragg diferente. Neste sistema podem ser incluídos vários sensores na mesma fibra óptica com diferentes comprimentos de onda, sendo cada um deles separado do seguinte por alguns nanómetros. Os sensores são tratados individualmente pelo seu comprimento de onda de Bragg, que é alterado devido às perturbações externas.

Técnicas de interrogação

Para utilizar uma FBG como sensor, esta deve ser iluminada por uma fonte óptica de elevada largura espectral, e o comprimento de onda reflectido deve ser medido e relacionado com o parâmetro de interesse a monitorizar. As mudanças no comprimento de onda de Bragg podem ser monitorizadas por diversas técnicas, como por exemplo, por interferometria simples [17], filtros de Fabry-Perot [18], redes combinadas [19], filtros acústico-ópticos sintonizáveis [20], redes de período longo (*Long Period Grating*, LPG) [21, 22], anéis de Sagnac com redes de Bragg aperiódicas [23] ou com interferómetro de Mach-Zehnder [24].

Algumas dessas soluções oferecem elevada resolução no domínio do comprimento de onda medido, no entanto, ou são bastante complexas ou apresentam elevados custos de implementação. A técnica de interferometria pode ser usada para converter variações de comprimento de onda em mudanças de fase, medindo variações na intensidade da luz relacionada com alterações no caminho do interferómetro óptico. Esta técnica permite, potencialmente, sensibilidades elevadas, mas o equipamento necessário é dispendioso e pode ser sensível a interferências ambientais. Um dos métodos mais utilizados consiste em utilizar um filtro óptico com uma variação linear de comprimento de onda. Devido à sua simplicidade, elevada taxa de amostragem e menor custo de implementação, esta técnica é apropriada para medições dinâmicas, por exemplo para demodular o sinal de um acelerómetro óptico baseado em FBGs. Este método foi inicialmente proposto na referência [25] e inclui uma banda passante óptica caracterizada por uma função de transferência linear na faixa espectral de sintonia da FBG. Quando o comprimento de onda de Bragg se altera, induz uma variação da potência óptica transmitida pelo filtro óptico.

Discriminação do efeito da temperatura

Quando um sensor baseado numa FBG é submetido simultaneamente a deformações mecânicas e a variações de temperatura, a mudança de comprimento de onda de Bragg resulta da resposta a ambas as variações, simultaneamente. Devido à existência de informação cruzada é necessário

um método para discriminar a influência da temperatura e do parâmetro a monitorizar na variação total do comprimento de onda de Bragg.

O esquema mais comum para realizar a discriminação de efeitos consiste em usar duas redes de Bragg. Uma é submetida à deformação mecânica e às variações de temperatura, enquanto a outra é isolada da deformação mecânica, medindo apenas a variação da temperatura. A mudança de comprimento de onda da segunda rede permite determinar o efeito da temperatura, que pode então ser subtraído à alteração de comprimento de onda da primeira FBG, permitindo assim obter o valor da variação da tensão.

Outros métodos para a discriminação da temperatura e tensão têm sido propostos ao longo dos anos, sendo ainda uma área de investigação em desenvolvimento, com soluções inovadoras a surgirem regularmente. O primeiro sensor capaz de discriminar deformação e temperatura foi proposto por Xu *et al.*, em 1994, e baseia-se em duas redes de Bragg, sobrepostas, com comprimentos de onda muito distantes, nomeadamente 850 e 1300 nm [26]. Esta configuração experimental, que se apresenta na figura 2.8, explorou os diferentes coeficientes termo-ópticos e constantes fotoelásticas de duas redes de Bragg, para obter uma matriz com quatro coeficientes de temperatura e tensão diferentes.

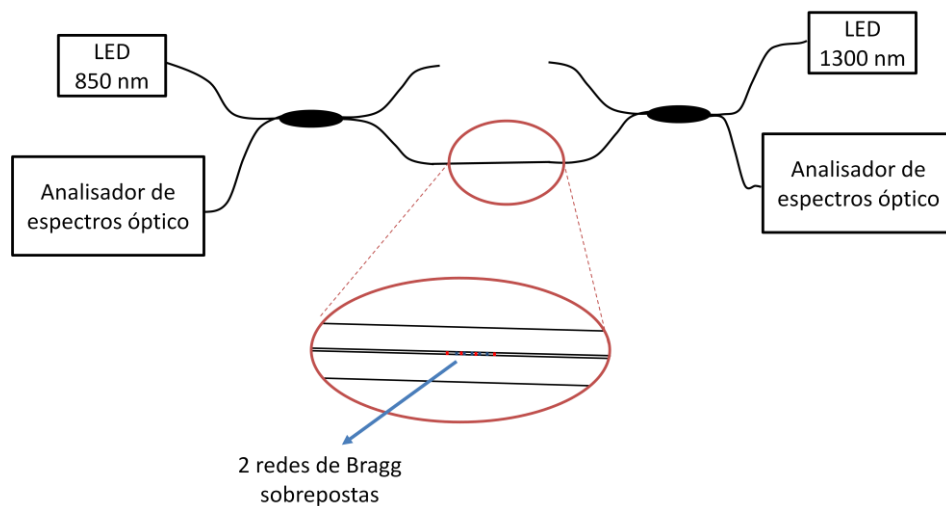


Figura 2.8: Configuração experimental utilizada por Xu *et al.*, em 1994, para discriminar os efeitos de temperatura e tensão [26].

A ideia de explorar os diferentes coeficientes de temperatura e tensão foi seguida por outros autores. Em 1996, James *et al.* utilizaram duas FBGs inscritas em fibras ópticas com diferentes diâmetros, obtendo coeficientes de deformação distintos [27]. Uma abordagem semelhante, mas com sensibilidades diferentes à temperatura, foi apresentada mais tarde, usando sensores de

Bragg inscritos na região emendada das fibras com diferentes dopantes [28]. Esta fórmula foi repetida utilizando fibras dopadas com diferentes concentrações [29] e com diferentes tipos de FBGs [30].

Mais recentemente, foi proposto um sensor baseado em duas redes de Bragg com diferentes revestimentos poliméricos [31]. O revestimento impõe diferentes respostas das redes e da sensibilidade do sensor a um parâmetro individual que pode ser determinado com precisão. Mondal *et al.* empregaram duas FBGs embutidas e montadas em lados opostos de uma tira de aço em forma de arco [32]. Os efeitos de tensão de compressão e tracção foram explorados para a discriminação da temperatura e da tensão.

Em 2010, Lima *et al.* discriminaram os valores de tensão e da temperatura pela informação codificada na largura de banda do sinal de Bragg [33]. Estes investigadores utilizaram uma FBG inscrita num *taper* de fibra óptica com uma variação linear de diâmetro. Quando submetida a uma dada tensão, e devido às diferentes secções transversais da fibra ao longo do seu comprimento, obtêm-se diferentes valores de tensão, ocasionando o alargamento espectral do sinal da FBG e permitindo a utilização da informação contida na variação do comprimento de onda de Bragg e da largura espectral. Neste caso, quando ocorrem variações de temperatura assume-se que estas não afectam a largura espectral do espectro de reflexão da rede, verificando-se apenas um desvio do espectro completo, proporcional à variação de temperatura. Assim, a variação do comprimento de onda é afectada por variações de temperatura e de tensão, e a largura espectral apenas responde a variações de tensão. Calculando ambas as sensibilidades à temperatura é possível a sua discriminação com sucesso.

Encapsulamento dos sensores

A baixa resistência mecânica de um sensor FBG deve-se à inscrição directa da rede na fibra óptica. Assim, é necessária uma protecção adequada, para uma instalação fácil, prática e de longa duração em infra-estruturas. Várias técnicas de encapsulamento têm sido propostas para aplicações específicas.

Um dos esquemas foi proposto por Zhou *et al.*, em 2003, e consiste no encapsulamento da FBG num tubo capilar de metal, com dois suportes nas extremidades, projectado para ser embutido numa estrutura [34]. Esta configuração transfere a deformação da estrutura para o sensor, protegendo-o. Um ano depois, Slowik *et al.* apresentaram um esquema similar, adicionando um invólucro de plástico para protecção adicional contra o ambiente alcalino do cimento [35]. Para

montagens de superfície em estruturas metálicas ou de betão, uma técnica comum de protecção da FBG consiste na colagem de uma fibra óptica com o sensor FBG entre duas placas de metal, como descrito em [34]. Nesta técnica, uma vez que a fibra é encapsulada entre as camadas de metal, a sensibilidade é diferente da correspondente à FBG original, e assim é necessária a calibração dos sensores antes da instalação.

Em 2006, Leng *et al.* propuseram também vários projectos para a protecção de sensores FBG [36]. Estes incluíam sensores FBG protegidos por polímero de fibra de carbono, tubos e barras de aço. Este trabalho avaliou também a eficiência de transferência de tensão entre a protecção do sensor e a região de detecção da fibra óptica. A validação experimental das técnicas de protecção propostas permitiu a comparação entre o desempenho dos sensores com base em FBGs com extensómetros de resistência eléctrica, revelando uma boa concordância entre as duas tecnologias de detecção.

Algumas técnicas de encapsulamento, para além de fornecerem protecção aos sensores, solucionam também o problema da sensibilidade cruzada à temperatura. Projectos de encapsulamentos atérmicos para redes de Bragg, capazes de compensar a mudança de comprimento de onda induzida pela alteração da temperatura têm sido propostos [37, 38].

2.7 REFERÊNCIAS

- [1] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, 2ª ed., San Diego, EUA: Academic Press, 1995.
- [2] S. Yin, P. B. Ruffin and F. T. S. Yu, *Fiber Optic Sensors*, 2nd Revised edition ed.: Taylor & Francis Inc, 2008.
- [3] B. S. Kawasaki, K. O. Hill, D. C. Johnson and Y. Fujii, "Narrow-Band Bragg Reflectors in Optical Fibers", *Optics Letters*, vol. 3, pp. 66-68, 1978.
- [4] K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson and B. S. Kawasaki, "Photosensitivity in Optical Fiber Waveguides - Application to Reflection Filter Fabrication", *Applied Physics Letters*, vol. 32, pp. 647-649, 1978.
- [5] R. Nogueira, "Redes de Bragg em fibra óptica", Tese de Doutoramento, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2005.

- [6] T. Erdogan, "Fiber grating spectra", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 15, pp. 1277-1294, 1997.
- [7] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*: Artech House, 1999.
- [8] R. Kashyap, *Fiber Bragg gratings*: Academic Press; 2ª ed., 2010.
- [9] G. Meltz, W. W. Morey and W. H. Glenn, "Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method", *Optics Letters*, vol. 14, pp. 823-825, 1989.
- [10] C. A. F. Marques, "Gravação de redes de Bragg avançadas em fibra óptica", Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.
- [11] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta and D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring--Present status and applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, pp. 150-164, 2008.
- [12] M. Jose Manuel Menendez and G. Alfredo Guemes, "SHM using fiber sensors in aerospace applications", Optical Fiber Sensors (OFS), Cancún, Mexico, October 23, 2006.
- [13] P. F. C. Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. L. Pinto, R. N. Nogueira, H. Varum, A. G. Costa and P. S. B. André, "Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring", *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 1347-1354, 2009.
- [14] P. Antunes, "Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg", Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- [15] W. H. Chung, H. Y. Tam, P. K. A. Wai and A. Khandelwal, "Time and wavelength-division multiplexing of FBG sensors using a semiconductor optical amplifier in ring cavity configuration", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 17, pp. 2709-2711, 2005.
- [16] Z. Zhou, T. W. Graver, L. Hsu and J.-p. Ou, "Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their application in the structural health monitoring of bridges", *Pacific Science Review*, vol. 5, pp. 116-121, 2003.

- [17] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Fiber-optic Bragg grating strain sensor with drift-compensated high-resolution interferometric wavelength-shift detection", *Optics Letters*, vol. 18, pp. 72-74, 1993.
- [18] A. D. Kersey, T. A. Berkoff and W. W. Morey, "Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry - Perot wavelength filter", *Optics Letters*, vol. 18, p. 1370, 1993.
- [19] D. A. Jackson, A. B. L. Ribeiro, L. Reekie and J. L. Archambault, "Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network", *Optics Letters*, vol. 18, pp. 1192-1194, 1993.
- [20] M. Volanthen, H. Geiger, M. G. Xu and J. P. Dakin, "Simultaneous monitoring of multiple fibre gratings with a single acousto-optic tunable filter", *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 1228-1229, 1996.
- [21] J. Jung, Y. W. Lee and B. Lee, "Novel interrogation system for dynamic strain measurement based on fiber Bragg grating sensor using long period grating pair and EDF", Lasers and Electro-Optics Society 2000 Annual Meeting, Puerto Rico, 2000.
- [22] L. Zhang, R. Fallon, L. A. Overall, J. A. R. Williams and I. Bennion, "Large-dynamic-range and high resolution from a strain sensing system using long-period grating interrogating FBG strain sensor", ECOC'98, Spain, 1998.
- [23] D. Zhao, X. Shu, L. Zhang and I. Bennion, "Sensor interrogation technique using chirped fibre grating based Sagnac loop", *Electronics Letters*, vol. 38, pp. 312-313, 2002.
- [24] Y. Jiang, "Four-element FBG acceleration sensor array", *Optics & Lasers in Engineering*, vol. 46, pp. 695-703, 2008.
- [25] S. M. Melle, K. Liu and R. M. Measures, "A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 516-518, 1992.
- [26] M. G. Xu, J. L. Archambault, L. Reekie and J. P. Dakin, "Discrimination between Strain and Temperature Effects Using Dual-Wavelength Fiber Grating Sensors", *Electronics Letters*, vol. 30, pp. 1085-1087, 1994.

- [27] S. W. James, M. L. Dockney and R. P. Tatam, "Simultaneous independent temperature and strain measurement using in-fibre Bragg grating sensors", *Electronics Letters*, vol. 32, pp. 1133-1134, 1996.
- [28] P. M. Cavaleiro, F. M. Araujo, L. A. Ferreira, J. L. Santos and F. Farahi, "Simultaneous measurement of strain and temperature using Bragg gratings written in germanosilicate and boron-codoped germanosilicate fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 1635-1637, 1999.
- [29] O. Frazao and J. L. Santos, "Simultaneous measurement of strain and temperature using a Bragg grating structure written in germanosilicate fibres", *Journal of Optics a-Pure and Applied Optics*, vol. 6, pp. 553-556, 2004.
- [30] X. W. Shu, Y. Liu, D. H. Zhao, B. Gwandu, F. Floreani, L. Zhang and I. Bennion, "Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement", *Optics Letters*, vol. 27, pp. 701-703, 2002.
- [31] P. Lu, L. Q. Men and Q. Y. Chen, "Resolving cross sensitivity of fiber Bragg gratings with different polymeric coatings", *Applied Physics Letters*, vol. 92, 2008.
- [32] S. K. Mondal, V. Mishra, U. Tiwari, G. C. Poddar, N. Singh, S. C. Jain, S. N. Sarkar and P. Kapur, "Embedded dual fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of temperature and load (Strain) with enhanced sensitivity", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 51, pp. 1621-1624, 2009.
- [33] H. F. Lima, P. F. Antunes, J. L. Pinto and R. N. Nogueira, "Simultaneous measurement of strain and temperature with a single fiber Bragg grating written in a tapered optical fiber", *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, pp. 269-273, 2010.
- [34] D. P. Zhou, T. Graver, L. Hsu and J. P. Ou, "Techniques of advanced FBG sensors: fabrication, demodulation, encapsulation and their applications in the structural health monitoring of bridges", *Pacific Science Review*, vol. 5, p. 6, 2003.
- [35] V. Slowik, E. Schlattner and T. Klink, "Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings", *Cement & Concrete Composites*, vol. 26, pp. 473-479, 2004.

- [36] J. S. Leng, R. A. Barnes, A. Hameed, D. Winter, J. Tetlow, G. C. Mays and G. F. Fernando, "Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors", *Sensors and Actuators a-Physical*, vol. 126, pp. 340-347, 2006.
- [37] A. E. Johnson, E. P. Donlon, F. D. Braun and L. V. Hoang, "Athermal package for fibre Bragg gratings with two or more bonding regions", US Patent Patent 6.856.730, 2005.
- [38] Y. L. Lo and C. P. Kuo, "Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for an athermal design", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 21, pp. 1377-1383, 2003.

Capítulo 3

Monitorização da integridade estrutural

3.1 INTRODUÇÃO

O objectivo principal da monitorização da integridade estrutural (*Structural Health Monitoring*, SHM) é observar o comportamento estrutural *in-situ* sob diferentes condições de carga, durante um período de tempo pré-determinado ou durante todo o período de vida útil das estruturas, por forma a detectar a deterioração das propriedades dos materiais estruturais e/ou a resposta estrutural para certas condições específicas de solicitação. A integridade da estrutura deve ser verificada regularmente como a saúde de um ser humano, recorrendo a equipamentos avançados e específicos para cada fim. Com base nos resultados obtidos, a integridade é avaliada e, se necessário, é estabelecido um plano de intervenção. Na SHM utilizam-se sensores avançados, a fim de avaliar a integridade da estrutura em causa, permitindo avaliar a integridade estrutural e a durabilidade. Em qualquer caso, a avaliação preventiva, apoiada na monitorização, pode identificar precocemente os problemas e até auxiliar na definição de linhas de orientação para a solução de reparação ou reabilitação a adoptar. Várias catástrofes naturais, como terremotos, furacões ou desabamentos, ocorridos recentemente, provocaram um grande número de vítimas e consideráveis perdas económicas devido ao colapso de estruturas de engenharia

civil. Portanto, a necessidade de identificar danos estruturais e monitorizar a sua evolução impõe o desenvolvimento de técnicas de SHM [1, 2]. Estas técnicas são apoiadas por dados recolhidos por redes de sensores que, por sua vez são relacionados com o comportamento e resposta da estrutura, fornecendo indicadores sobre eventuais danos ou anomalias que possam afectar a integridade da estrutura. Os dados são obtidos em condições de tempo real, sendo considerado um grupo alargado de parâmetros relacionados com as propriedades dos materiais e resposta da estrutura, tais como tensão, deformação ou aceleração.

Um sistema SHM é composto por diversos subgrupos, tais como: aquisição de dados; armazenamento; comunicação de dados; processamento; diagnóstico e sistema de alerta [3]. A aquisição de dados envolve a definição prévia do plano de monitorização e instalação de sensores para aquisição de informação relevante sobre o comportamento estrutural. A comunicação de dados depende do sistema SHM em causa, estando associada à transferência de informação entre o sistema de aquisição e a estação de armazenamento dos dados. Além disso, a definição da estratégia de comunicação depende da complexidade do sistema de aquisição de dados e das características do local onde estes são armazenados, podendo ser comunicados por sistemas com ou sem cablagem. O sistema de processamento de dados inclui o controlo directo das medidas obtidas pelos sensores, e seu processamento, permitindo a realização de acções, como por exemplo, correcção térmica da medição ou selecção dos dados a serem armazenados ou analisados. Por exemplo, no registo da resposta de uma torre esbelta, só para valores da velocidade do vento superiores a um determinado limite é que a leitura dos sensores é armazenada. Portanto, em muitas situações deve ser realizado um pré-tratamento dos dados antes do seu armazenamento. Os dados obtidos podem então ser utilizados para o diagnóstico e avaliação da estrutura em tempo real. Para problemas de análise da degradação estrutural e de envelhecimento, as propriedades dos materiais ou os parâmetros de resposta estrutural medidos devem ser registados ao longo do tempo. O diagnóstico é a fase final de um programa de SHM que, combinando medidas individuais em cada sensor, permite a análise e interpretação do comportamento estrutural, podendo conduzir a uma eventual recomendação para intervenção na estrutura.

3.2 EVOLUÇÃO DA MONITORIZAÇÃO DA INTEGRIDADE ESTRUTURAL

As técnicas de SHM estão em desenvolvimento contínuo. Nas últimas duas décadas foram utilizadas em aplicações industriais de engenharia mecânica e aeroespacial, no entanto a

integração de SHM em estruturas de engenharia civil está a adquirir uma importância crescente [4]. Muitas estruturas e infra-estruturas importantes de engenharia civil, entre elas estruturas públicas, têm sido construídas nas últimas décadas e, em alguns casos, o maior arrojo na sua concepção e/ou dificuldade na sua construção faz com que a segurança da estrutura dependa de vários parâmetros com distintos níveis de incerteza, como a geometria, propriedades dos materiais e solicitações durante a sua vida útil. Deve sublinhar-se que, em alguns casos, as estruturas têm margens de segurança associadas limitadas.

Actualmente, os sistemas de infra-estruturas de transporte estão directamente relacionados com o desenvolvimento económico das nações [5]. Em particular, as pontes são estruturas críticas do sistema de transportes e, por razões evidentes, a aplicação de sistemas SHM é mais frequente nestas estruturas do que nos edifícios correntes. Steven Lovejoy apresenta oito elementos-chave para o sucesso de um sistema SHM aplicado a pontes rodoviárias, podendo também ser extensível a outras estruturas de engenharia civil [6]:

- ✓ O dono-de-obra deve identificar claramente os parâmetros que serão medidos e como estas medidas estão relacionadas com a resposta da estrutura a monitorizar;
- ✓ Deve ser determinado se existe necessidade de um sistema de monitorização apenas ou se este deve ser combinado com um sistema de alerta. Se este último for escolhido tem que ser estabelecida uma estratégia de análise e resposta clara e robusta;
- ✓ A redundância de equipamento é desejável, especialmente em aplicações críticas, como em sistemas de alerta;
- ✓ Devem ser utilizados componentes robustos e práticas de instalação rigorosas, incluindo a protecção mecânica a agressões ambientais;
- ✓ Optimizar o número de pontos a monitorizar;
- ✓ Os dados devem ser facilmente recolhidos, armazenados, manipulados e comunicados ao dono-de-obra ou responsável pela segurança da estrutura;
- ✓ Fiscalizar e controlar regularmente os dados da monitorização, por forma a detectar defeitos ou degradação em componentes ou sensores, evitando perda de dados ou dados incorrectos;
- ✓ Inspeccionar e realizar manutenção periódica de toda a instalação e componentes do sistema.

Como referido anteriormente, a evolução das obras de engenharia civil tem introduzido sistemas estruturais de maior envergadura e complexidade. Por outro lado, os novos materiais e soluções

estruturais tendem a produzir estruturas mais leves. A evolução do conhecimento e da regulamentação tende também a exigir um maior rigor no controlo da segurança estrutural. Este enquadramento apresenta várias dificuldades e exigências que abrem porta ao desenvolvimento e aplicação dos sistemas de SHM para aplicações em estruturas de engenharia civil.

Uma outra potencial aplicação dos sistemas de SHM consiste na monitorização de edifícios históricos. Nestes casos a identificação de defeitos e danos pode ser difícil, o que torna a intervenção de reabilitação complexa e delicada. Para este tipo de estruturas, os dados recolhidos a partir da monitorização estrutural são muitas vezes a única fonte de informação que permite entender o comportamento destas estruturas, e desta forma suportar uma intervenção adequada. Como exemplo, cita-se o trabalho desenvolvido na nave principal da Igreja de Santa Maria de Belém, no Mosteiro dos Jerónimos, em Lisboa, onde dois sistemas de monitorização foram implementados, para caracterizar o comportamento estático e dinâmico da estrutura, visando a detecção de danos e a melhoria da capacidade sísmica do monumento. O sistema de monitorização de saúde estrutural foi implementado procurando observar as mudanças nos parâmetros caracterizadores da resposta estática e dinâmica, combinado com medidas de acções ambientais [7].

3.3 TESTES DE CAMPO

O principal objectivo da monitorização estrutural consiste em controlar os aspectos que têm implicações no desempenho ou na segurança estrutural de uma forma pró-activa, usando dados experimentais e/ou resultados de simulações para identificar possíveis problemas ou deficiências no comportamento devido a acções externas (originadas por desastres naturais como terramotos e ventos fortes, ou pelo homem, como explosões) e deterioração devido aos efeitos ambientais. A identificação de danos é realizada com base em mudanças nas propriedades dos materiais ou da resposta da estrutura, fornecendo informação útil para apoiar o dono-de-obra na tomada de decisões adequadas numa fase precoce [2].

A deterioração das infra-estruturas de engenharia civil na América do Norte, Europa e Japão tem sido estudada com profundidade. Nos Estados Unidos, 50 % das pontes foram construídas antes da década de 1940, e aproximadamente 42 % destas estruturas já apresentam deficiências [8, 9]. Estas estatísticas sublinham a importância do desenvolvimento de métodos fiáveis e de baixo custo para a monitorização e realização de investimentos na reabilitação nos próximos anos [10].

A definição dos principais objectivos e os resultados esperados a partir da SHM tem implicações na concepção de todo o sistema. A análise experimental pode ser classificada em: monitorização da geometria, ensaios controlados (que podem ser estáticos ou dinâmicos, não-destrutivos, semi-destrutivos ou destrutivos), e monitorização contínua [11]. A monitorização da geometria das estruturas não é normalmente contínua, pode ser realizada com intervalos de tempo mais longos, e tem como objectivo verificar mudanças na geometria da estrutura associadas a eventuais assentamentos de fundações. Nos testes controlados (estáticos e dinâmicos) é feita a medição da resposta da estrutura sob a aplicação de cargas controladas e/ou acções do meio ambiente. Este tipo de testes tem uma duração limitada. Como ensaios estáticos referem-se os testes de carga para a verificação da capacidade de carga e/ou rigidez da estrutura global ou de um determinado elemento estrutural. Os ensaios dinâmicos servem para identificar as propriedades dinâmicas da estrutura, ou seja, as frequências próprias, os modos de vibração e o amortecimento.

A monitorização de uma estrutura a longo prazo é agora possível devido aos avanços recentes na tecnologia de sensores, computação e tecnologias da comunicação, permitindo o acompanhamento da resposta das estruturas durante vários anos e, eventualmente, durante toda a sua vida útil. Neste tipo de monitorização podem-se classificar as medições realizadas em duas categorias: i) monitorização com baixa taxa de amostragem, para medir e registar, por exemplo, os deslocamentos e deformações da estrutura ao longo da sua vida útil, e ii) monitorização com alta taxa de amostragem para eventos que ocorram durante um curto intervalo de tempo, como terremotos, incêndios ou explosões. Cada categoria exige diferentes sensores, sistemas de aquisição de dados, de pós-processamento, interpretação e estratégias de comunicação e de gestão da informação [11].

No caso de pontes, os ensaios estáticos e dinâmicos são realizados usualmente antes da sua entrada em serviço, com o objectivo de se verificar o comportamento real da estrutura e compará-lo com os resultados numéricos obtidos na fase de projecto. Esta análise possibilita uma representação real da resposta das estruturas sob carregamento estático ou dinâmico e a obtenção de parâmetros de resposta da estrutura original intacta, que pode ser útil, por exemplo, para uma avaliação futura do seu estado de conservação.

A rede de sensores implementados na ponte pedonal circular de aço construída recentemente em Aveiro, Portugal, combina sensores de deformação e de temperatura. O plano de monitorização foi estabelecido de acordo com os resultados obtidos anteriormente por análise numérica da

resposta da estrutura [12]. Era esperado que a rede de sensores de fibra óptica de deformação fornecesse a distribuição de tensões nos elementos estruturais mais importantes da ponte, nomeadamente nos cabos de suspensão. As medidas obtidas com a rede de sensores instalada possibilitou o aperfeiçoamento e a calibração dos modelos numéricos, bem como o acompanhamento em tempo real da integridade estrutural da ponte, durante os testes de carga e depois em serviço. Um dos objectivos principais das duas séries de ensaios estáticos realizados na ponte foi avaliar e ajustar o nível de esforço axial nos cabos e monitorizar a sua variação no tempo.

3.4 PARÂMETROS A MONITORIZAR

A monitorização de uma construção inclui a análise/caracterização de materiais e monitorização da integridade estrutural. Para uma estrutura específica em serviço, poderá ser de interesse avaliar e caracterizar as propriedades dos materiais utilizados na construção. Esta acção é classificada como monitorização da integridade material (*Material Health Monitoring*, MHM) e abrange medições de módulo de rigidez, tensão, deformação e densidade do material estrutural, e a análise da sua influência na durabilidade das estruturas [13]. Esta abordagem poderá requerer um número muito elevado de sensores instalados em diferentes pontos, registando informação útil para a caracterização do comportamento de toda a estrutura a partir dessas medições locais [14]. A SHM pode incluir a monitorização das cargas aplicadas a uma estrutura e a avaliação da sua influência em termos de tensões, deformações ou vibrações. A monitorização estrutural pode detectar a degradação dos materiais, o aparecimento de fendas ou deformação sob carga constante, e se estes aspectos têm impacto sobre a forma da estrutura. Esta abordagem geralmente requer um número mais reduzido de sensores em relação à monitorização material [14]. Como exemplo, na monitorização da Igreja da Santa Casa da Misericórdia, em Aveiro, Portugal, apenas a solução de SHM foi adoptada (com sensores de deslocamento relativo e temperatura). Após a inspecção visual, observou-se que uma das zonas com maior concentração de dano se encontrava localizada no arco principal e nas paredes estruturais acima dele. Após a análise dos danos estruturais, foi estrategicamente aplicado um conjunto de sensores nos pontos onde as deformações mais importantes foram identificadas e onde se previa potencial desenvolvimento de novos danos [15].

No caso das pontes, a deterioração devido ao envelhecimento e degradação dos materiais ou ao aumento de cargas de tráfego levantam preocupações sobre a sua fiabilidade e segurança. Uma

das formas de verificar a segurança das pontes existentes baseia-se na realização de testes de carga. Um teste deste tipo, realizado com êxito, pode demonstrar de imediato se a capacidade de uma ponte é suficiente para o peso da estrutura, dos elementos não estruturais e para as acções de serviço [16]. Em alguns casos, uma avaliação do estado de degradação da estrutura tem que ser feito considerando as acções combinadas de SHM e de MHM. Por exemplo, nas intervenções do Castelo Tele, no município de Praga, na República Checa, a evolução das fissuras em paredes de alvenaria foi monitorizada em conjunto com as variações de temperatura e humidade [17].

Normalmente, em aplicações de SHM em estruturas de engenharia civil, os parâmetros monitorizados com maior frequência incluem a caracterização ou a medição da tensão, deslocamento relativo, acelerações, presença de fissuras, variação da abertura das fissuras, nível de pH, humidade e temperatura [18].

O acompanhamento da evolução da geometria é um ponto-chave na monitorização estrutural. A mudança na forma de uma estrutura, e a sua origem, pode estar associada a uma variedade de agentes. Alguns exemplos incluem forças conhecidas aplicadas a uma estrutura durante os testes de carga ou outras solicitações, como as resultantes do tráfego, vento, terremotos ou neve [19].

Deformações, fissuras, relaxamentos ou variações de temperatura podem também resultar em alterações no comportamento dos materiais constituintes da estrutura. A deformação é geralmente associada a uma mudança da distribuição das tensões na estrutura [20]. Esta medição pode permitir a caracterização das propriedades do material a nível local, bem como a resposta estrutural global baseada em deformações/deslocamentos num ponto representativo ou secção da estrutura. As deformações podem ser medidas com sensores incorporados e instalados durante a fase de construção (por exemplo, em elementos de betão), ou colocados sobre a superfície exterior da estrutura após a sua construção. Todavia, para obter deslocamentos estruturais globais, os sensores incorporados podem não ser eficazes, uma vez que existe a necessidade de medidas de deslocamento relativamente a pontos de referência externa. Para esses casos, sensores para medida de deslocamentos globais, tais como sistemas de posicionamento global (*Global Positioning System*, GPS), inclinómetros, sensores de medição de deslocamento linear diferencial (*Linear Variable Differential Transformer*, LVDT), entre outros, podem ser utilizados [20].

A monitorização de forças globais pode ser importante para estruturas onde existe a expectativa de aplicação de carga superior ao valor de projecto, afectando a segurança estrutural ou o seu

desempenho. Assim, em muitos casos, a distribuição das cargas e o nível de tensões nas várias secções da estrutura devem ser medidos. Como exemplos, as pontes onde cargas excepcionais podem ocorrer, associadas à passagem de veículos pesados ou a um evento sísmico.

Na resposta dinâmica de uma estrutura, as vibrações podem ser avaliadas por diferentes métodos, baseados na medição do movimento, aceleração, deformações, ou forças em pontos representativos. Relativamente ao acompanhamento do movimento, os métodos mais comuns são baseados na aquisição de deslocamentos, velocidades e acelerações. A aceleração é frequentemente utilizada, sendo medida com recurso a acelerómetros com elevada precisão. Os sensores de aceleração são também comumente utilizados para determinar as forças axiais em elementos de cabo, pelo cálculo das suas frequências naturais, a partir da medição de acelerações. Este procedimento pode ser utilizado para a monitorização a longo prazo de pontes com cabos, ou para o controlo da tensão inicial imposta nos cabos [12]. Na maioria dos programas de monitorização estrutural, a determinação da temperatura ambiente é incluída, pois em determinados sensores, tais como os baseados em redes de Bragg, o valor da temperatura ambiente é necessário para a correcção dos dados adquiridos. A monitorização da temperatura é igualmente essencial para a determinação dos gradientes de temperatura ou do calor de hidratação dos materiais e do seu efeito sobre as propriedades destes.

Além da caracterização das propriedades mecânicas, em aplicações de engenharia civil, outras propriedades físicas e químicas e processos de medição podem ser necessários para a rigorosa compreensão da resposta estrutural de certas construções. Por exemplo, em algumas estruturas pode ser necessário medir temperatura, humidade e fenómenos electroquímicos para garantir um conceito holístico de vigilância na avaliação estrutural. De facto, nas estruturas de engenharia civil mais recentes, o betão e o aço são os materiais utilizados com maior frequência. Assim, o acompanhamento da carbonatação do betão e da corrosão do aço são essenciais para avaliar a integridade estrutural e durabilidade [19]. A carbonatação e a corrosão são processos graduais e a sua detecção numa fase inicial é fundamental para evitar uma acelerada degradação estrutural. A carbonatação pode reduzir a alcalinidade do betão, permitindo a corrosão na armadura de reforço que ocorre quando o dióxido de carbono do ar reage com o betão, reduzindo o seu pH. A carbonatação do betão pode também induzir retracção adicional, o que provoca a formação de fissuras. A corrosão das barras de reforço induz uma deterioração precoce das estruturas de betão e reduz o seu período de vida útil [21]. Em particular, o aumento do uso de sais de degelo em climas severos, bem como o ataque do sal do mar nas zonas costeiras reforçam a

possibilidade de corrosão da armadura de aço. Vários métodos têm sido desenvolvidos para detectar e avaliar os efeitos da carbonatação do betão e corrosão do aço. Os métodos clássicos incluem a inspecção visual ou recolha de amostras a serem testadas em laboratório para determinação do nível de pH. No entanto, estas técnicas são destrutivas, necessitando-se de reparação do betão e aço de reforço após a extracção das amostras. Além disso, os resultados são limitados às amostras analisadas, o que pode não representar o estado global da estrutura [19]. O desenvolvimento de novas técnicas de controlo remoto baseadas em sensores embutidos para a medição do pH no betão e a avaliação da corrosão das armaduras pode facilitar a detecção precoce das suas patologias.

3.5 MONITORIZAÇÃO ESTRUTURAL E ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS

Existe um elevado número de técnicas de avaliação não-destrutivas (*Non-destructive Evaluation*, NDE), inspecção não-destrutiva (*Non-destructive Inspection*, NDI) e ensaios não-destrutivos (*Non-destructive Testing*, NDT) que permitem identificar danos locais e detectar falhas incipientes em estruturas críticas ou simplesmente caracterizar as propriedades dos materiais [22].

Os ensaios não-destrutivos permitem uma avaliação não destrutiva e avaliar o estado de dano actual de um material estrutural ou componente, sem a introdução de novos danos.

Ambos os sistemas de SHM (material e estrutural) e os ensaios não-destrutivos possibilitam a caracterização das propriedades dos materiais, a determinação de alguns parâmetros da resposta estrutural, bem como a identificação de um dado dano. No entanto, a SHM pode realizá-lo em tempo real e de forma contínua, permitindo uma estimativa do desempenho estrutural e, eventualmente, a emissão de alertas prévios de necessidade de estabilização ou de intervenção estrutural [23]. As técnicas de NDT são normalmente utilizadas para complementar os resultados de uma inspecção visual prévia, auxiliando na decisão de quais as necessidades de manutenção, reabilitação e reparação urgente. Os ensaios não-destrutivos incluem análise de vibração, termografia óptica, análise de emissão acústica, imagens de ultra-sons, raios-X de tomografia computadorizada, radar de penetração no solo, radiografia, correntes de Eddy ou Foucault, entre outros [24].

Os ensaios não-destrutivos podem ser vistos como ferramentas complementares aos sistemas SHM, dado poderem ser utilizados numa análise mais detalhada de um material ou componente estrutural, onde os sistemas SHM detectaram problemas. Nos casos em que não é esperada uma

variação significativa das propriedades dos materiais, os sistemas SHM podem ser projectados para medir os parâmetros globais de resposta estrutural, enquanto as propriedades dos materiais podem ser avaliadas através de ensaios não-destrutivos.

3.6 MODELOS NUMÉRICOS E SISTEMAS SHM

Os sistemas SHM associados à modelização numérica do comportamento de estruturas de engenharia civil permitem uma melhor representação da resposta da estrutura. Com os avanços recentes, os modelos numéricos disponíveis para simulação da resposta estrutural podem reproduzir com precisão o comportamento das construções. A distribuição e precisão da instrumentação implementada no plano da monitorização, bem como a complexidade do modelo numérico de elementos finitos podem variar de acordo com a finalidade do problema em análise. Assim, a selecção do sistema de monitorização e da abordagem na modelização deve ser feita com base em vários aspectos, como o tipo de estrutura, da sua importância, da urgência de intervenção, do impacto económico da interrupção do serviço, etc. [11].

A interacção entre SHM e os modelos matemáticos pode funcionar em ambos os sentidos. Por exemplo, os resultados de um modelo numérico de uma estrutura podem auxiliar a concepção do sistema de instrumentação e monitorização. No outro sentido, por exemplo, os resultados dos testes dinâmicos com identificação das frequências naturais da estrutura e modos de vibração podem permitir a calibração do modelo numérico estrutural.

Actualmente, por exemplo em pontes suspensas, a associação de SHM e de modelos numéricos é comumente adoptada, permitindo a detecção de eventuais danos nas pontes com base em modelos de identificação dinâmica [25]. Usando uma relação interactiva entre um sistema SHM e o modelo numérico da estrutura, pode ser seleccionada uma estratégia que permita [11]:

- ✓ Registrar, em maior detalhe, danos ou limitações de desempenho;
- ✓ Avaliar a vulnerabilidade estrutural em função das solicitações;
- ✓ Estimar a influência na resposta do valor da sobrecarga, eventos sísmicos ou outras acções imprevistas;
- ✓ Auxiliar no projecto de reforço estrutural devido a um dano observado ou a uma mudança na utilização da estrutura.

3.7 SISTEMAS DE SUPORTE À DECISÃO

Um sistema SHM pode permitir avaliar se a estrutura se comporta tal como foi concebida e/ou avaliar a sua segurança para a sua vida útil. Um prognóstico em termos de estimativa da vida útil da estrutura é fundamental para o dono-de-obra, que tem de decidir sobre a estratégia de manutenção a ser adoptada, ou sobre a eventual substituição da estrutura. Um sistema SHM pode compreender um número elevado de sensores, com recolha contínua de dados. No entanto, apenas parte desses dados é normalmente utilizada no processo de tomada de decisão. Os sistemas de suporte à decisão (*Decision Support Systems*, DSS) podem filtrar os dados, seleccioná-los e convertê-los em informação útil. Portanto, o operador recebe os dados convertidos e filtrados, podendo tomar decisões sobre a estratégia a ser seguida. Nas últimas décadas houve esforços para desenvolver sistemas de apoio à tomada de decisões em vários campos. Os DSS representam uma abordagem que procura integrar diversas disciplinas no campo da informática. A razão para o emergir dos DSS resulta da necessidade de se ter um sistema de ajuda a gerir situações bastante complexas que dependem de inúmeras variáveis e parâmetros. A adopção de um DSS permitirá tomar decisões baseadas numa melhor compreensão global do problema, o que leva o usuário a uma avaliação mais rigorosa, facilitando-lhe a escolha das alternativas [26]. Devido aos diversos problemas que podem ser encontrados associados às estruturas de engenharia civil, não existe uma solução única para os DSS e, portanto, estes devem ser projectados de acordo com cada problema em análise [27].

3.8 REFERÊNCIAS

- [1] A. H. Sohn, C. R. Farrar, F. M. Hemez, D. D. Shunk, S. W. Stinemates, B. R. Nadler and J. J. Czarnecki, "A review of structural health monitoring literature form 1996-2001", Los Alamos National Laboratory, 2004.
- [2] B. Culshaw, C. Michie, P. Gardiner and A. McGown, "Smart structures and applications in civil engineering", *Proceedings of the IEEE*, vol. 84, pp. 78-86, 1996.
- [3] ISIS Canada Corporation, "*Guidelines for Structural Health Monitoring*", *Design Manual* Nº. 2, 2001.
- [4] P. Antunes, H. Lima, N. Alberto, L. Bilro, P. Pinto, A. Costa, H. Rodrigues, J. L. Pinto, R. Nogueira, H. Varum and P. S. André, "Optical sensors based on FBG for structural health

- monitoring", *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*, vol. 1, S. C. Mukhopadhyay, Springer-Verlag, 2011.
- [5] P. F. Helmut Wenzel. (2010). *SHM at the Civil Infrastructure: Applications, recent Progress and future Demands*.
Available: http://www.brimos.com/Brimos/HTML/Frameset/Frameset_Downloads.htm
- [6] S. Lovejoy. (2010). *Applications of structural health monitoring to highway bridges*.
Available: <http://www.oregon.gov/ODOT/HWY/BRIDGE/index.shtml>
- [7] D. V. Oliveira, L. F. Ramos, P. B. Lourenço and J. Roque, "Structural monitoring of the Monastery of Jerónimos", *International Conference on the 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake*, Lisboa, 2005.
- [8] E. Aktan, S. Chase, D. Inman and D. D. Pines, "Monitoring and managing the health of infrastructure systems", *SPIE Conference on Health Monitoring of Highway Transportation Infrastructure, SPIE*, 2001.
- [9] J. M. Stallings, J. W. Tedesco, M. El-Mihilmy and M. McCauley, "Field performance of FRP bridge repairs", *Journal of Bridge Engineering*, vol. 5, pp. 107-113, 2000.
- [10] M. Fraser, A. Elgamal, J. P. Conte, S. Masri, T. Fountain, A. Gupta, M. Trivedi and M. E. Zarki, "Elements of an integrated health monitoring framework - smart nondestructive evaluation and health monitoring of structural and biological systems II", *Proceedings of the SPIE*, 2003.
- [11] A. E. Aktan, F. N. Catbas, K. A. Grimmelsma and M. Pervizpour, "Development of a model health monitoring guide for major bridges", Report Submitted to: Federal Highway Administration Research and Development, 2002.
- [12] C. Barbosa, N. Costa, L. A. Ferreira, F. M. Araújo, H. Varum, A. Costa, C. Fernandes and H. Rodrigues, "Weldable fibre Bragg grating sensors for steel bridge monitoring", *Journal of Measurement Science and Technology*, vol. 12, pp. 125305 -125315, 2008.
- [13] D. M. Jayant, "Health monitoring of civil engineering materials", Master Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2008.

- [14] D. Inaudi, S. Vurpillot, N. Casanova and P. Kronenberg, "Structural monitoring by curvature analysis using interferometric fiber optic sensors", *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, pp. 199-208, 1998.
- [15] H. F. Lima, R. D. Vicente, R. N. Nogueira, I. Abe, P. S. B. André, C. Fernandes, H. Rodrigues, H. Varum, H. J. Kalinowski, A. Costa and J. L. Pinto, "Structural health monitoring of the church of Santa Casa da Misericórdia of Aveiro using FBG sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol. 8, pp. 1236-1242, 2008.
- [16] M. H. Faber, D. V. Val and M. G. Stewart, "Proof load testing for bridge assessment and upgrading", *Engineering Structures*, vol. 22, pp. 1677-1689, 2000.
- [17] M. Drdácý, "Structural and material health monitoring of historical objects", *Sensing Issues in Civil Structural Health Monitoring*, F. Ansari, Springer, pp. 127-132, 2005.
- [18] S. C. Kuang, S. T. Quek, C. G. Koh, W. J. Cantwell and P. J. Scully, "Plastic optical fibre sensors for structural health monitoring: A review of recent progress", *Journal of Sensors*, vol. 2009, 2009.
- [19] FIBTaskGroup5.1, "Monitoring and safety evaluation of existing concrete structures - state-of-the-art report", 2002.
- [20] D. Inaudi, S. Vurpillot and S. Llore, "In-line coherence multiplexing of displacement sensors: a fiber optic extensometer", SPIE, Smart Structures and Materials, San Diego, USA, 1996.
- [21] J. Rodríguez, L. M. Ortega, J. Casal and J. M. Díez, "Assessing structural conditions of concrete structures with corroded reinforcement", *International Congress: Concrete in the Service of Mankind*, Conference N°. 5 Concrete Repair Rehabilitation and Protection, Dundee, UK, 1996.
- [22] V. Giurgiutiu and A. Cuc, "Embedded non-destructive evaluation for structural health monitoring, damage detection, and failure prevention", *The Shock and Vibration Digest*, vol. 37, pp. 83-105, 2005.
- [23] D. Adams, *Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications*: John Wiley & Sons Inc., 2007.

- [24] D. Pines and A. E. Aktan, "Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States", *Progress in Structural Engineering and Materials*, vol. 4, pp. 372–380, 2002.
- [25] J. M. Caicedo and S. J. Dyke, "Implementation of a SHM method on a numerical model of a cable-stayed bridge", *Proceeding of the 2004 American Control Conference*, Boston, Massachusetts, 2004.
- [26] B. Freudenthaler, G. Gutenbrunner, R. Stumptner and J. Küng, "Case-based decision support for bridge monitoring", *The Third International Multi-Conference on Computing in the Global Information Technology*, IEEE, 2008.
- [27] H. Wenzel, *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons, Ltd ed., 2009.

Capítulo 4

Acelerómetros implementados

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo descrevem-se os acelerómetros ópticos baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica concebidos, implementados e utilizados no decorrer deste trabalho de doutoramento. Foram simulados três acelerómetros uniaxiais, dos quais dois foram implementados. Foi ainda simulado, desenvolvido e implementado um acelerómetro biaxial, insensível a variações de temperatura e a efeitos de rotação, com possibilidade de ser utilizado como inclinómetro.

4.2 ACELERÓMETRO V1

O primeiro modelo de acelerómetro usado no decorrer do trabalho de doutoramento foi implementado e caracterizado na referência [1]. No entanto, dado o seu desempenho foi utilizado

como ponto de partida para o desenvolvimento de novas versões de acelerómetros uniaxiais que serão apresentados nas secções seguintes. Este primeiro modelo é designado como modelo V1.

O acelerómetro foi projectado e implementado de modo a apresentar elevada sensibilidade a baixas frequências, tendo em conta que estes são os valores típicos para os modos de vibração de uma importante família de estruturas de engenharia civil.

O elemento sensor do acelerómetro é uma rede de Bragg, gravada numa fibra óptica fotossensível monomodo, ancorada em dois pontos, A e B, como se ilustra na figura 4.1. A estrutura do acelerómetro consiste numa massa inercial de latão, apoiada por um *cantilever* de alumínio, ligado à estrutura base por uma mola em lâmina em aço e pela fibra óptica com a rede de Bragg. Quando exposto a uma aceleração externa, a massa inercial move-se no sentido vertical, impondo uma contracção/expansão da fibra óptica. Essa deformação induz a alteração do comprimento de onda de reflexão da rede de Bragg. Como a amplitude de vibração é pequena quando comparada com as dimensões do *cantilever*, pode-se considerar, por simplificação, que o movimento da massa inercial ocorre apenas na direcção vertical. O uso de uma mola de secção rectangular minimiza a sensibilidade cruzada, sendo que as suas dimensões determinam a faixa dinâmica e a sensibilidade do acelerómetro [1].

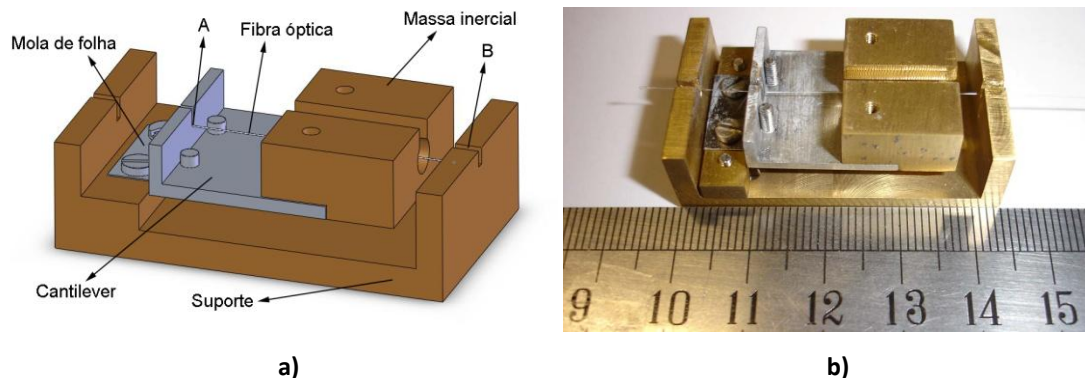


Figura 4.1: Acelerómetro modelo V1.

a) Esquema e b) fotografia com régua de referência graduada em centímetros.

Aplicando uma carga vertical sobre a massa inercial do acelerómetro e removendo-a subitamente, a massa inercial oscila com a frequência própria do acelerómetro. Medindo a resposta do acelerómetro é possível obter o valor da sua frequência própria.

Na figura 4.2 apresenta-se a resposta do acelerómetro após aplicação e remoção súbita de uma carga vertical, quatro vezes, durante 25 segundos. Os dados foram adquiridos com uma taxa de amostragem de 2683 Hz, com um espectrómetro óptico da *Ibsen* (modelo I-MON 80D-R).

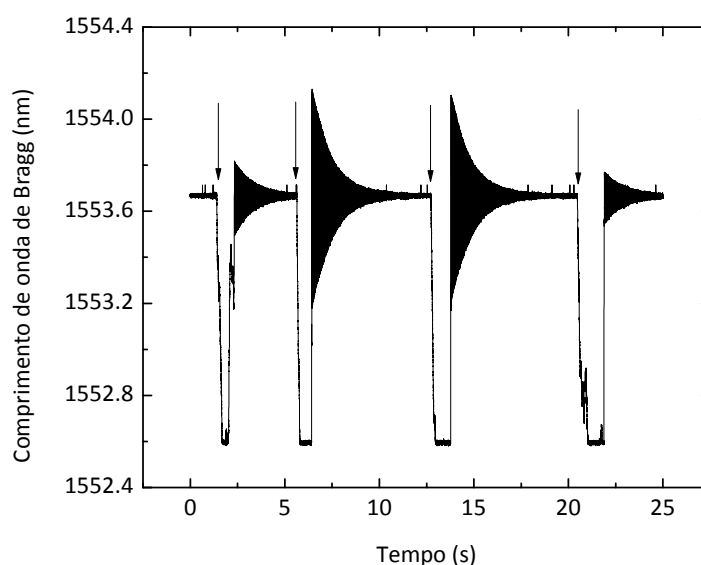


Figura 4.2: Resposta do acelerómetro modelo V1 à aplicação e remoção súbita de uma carga vertical. As setas indicam o instante da aplicação da carga vertical.

A transformada de Fourier da resposta do acelerómetro, que se mostra na figura 4.3, permite identificar a sua frequência própria.

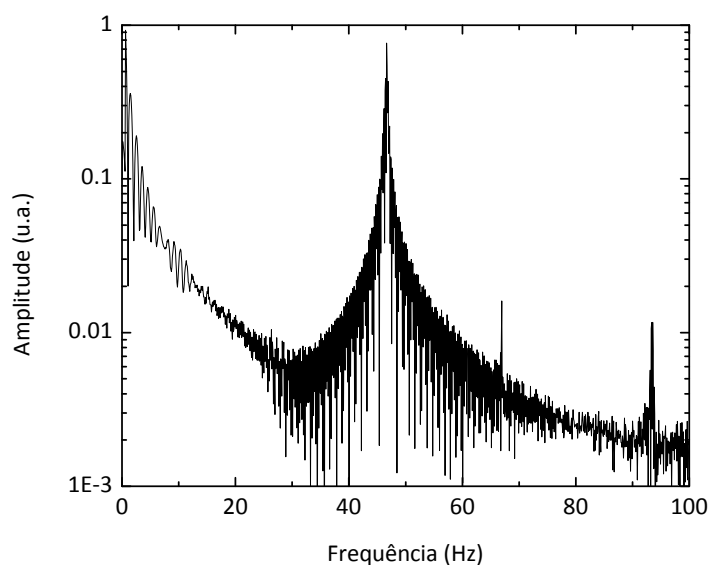


Figura 4.3: Espectro de frequências dos dados representados na figura 4.2.

Obteve-se um valor de 46.77 Hz para a frequência própria do acelerómetro, o qual permitirá a validação do modelo numérico de simulação apresentado no que se segue. O espectro de frequências apresenta ainda alguns picos secundários que poderão estar relacionados com o facto de o sensor ser constituído por diversas componentes ligadas por meio de parafusos de aço, que introduzem alguma flexibilidade local.

4.2.1 SIMULAÇÃO

Tendo em conta que o acelerómetro tinha sido previamente caracterizado em termos experimentais, optou-se por utilizar uma aplicação numérica de simulação que permitisse projectar e otimizar os novos modelos de acelerómetros a desenvolver, economizando tempo e recursos laboratoriais, bem como recursos financeiros.

Pela sua simplicidade e eficiência, optou-se pelo programa *Ansys®*, versão 11, baseado em elementos finitos, que permite resolver numericamente uma grande variedade de problemas mecânicos [2]. Esses problemas incluem: análise estrutural estática, análise dinâmica (linear e não linear), transferência de calor e problemas de fluidos, bem como problemas acústicos e electromagnéticos. O valor da frequência própria do acelerómetro foi calculado com o modelo numérico e comparado com o valor experimental, permitindo assim validar o modelo de simulação que será usado no desenvolvimento de outros protótipos.

No modelo consideraram-se as dimensões indicadas na figura 4.4, tendo sido também tidas em conta as propriedades dos materiais usados na construção do acelerómetro.

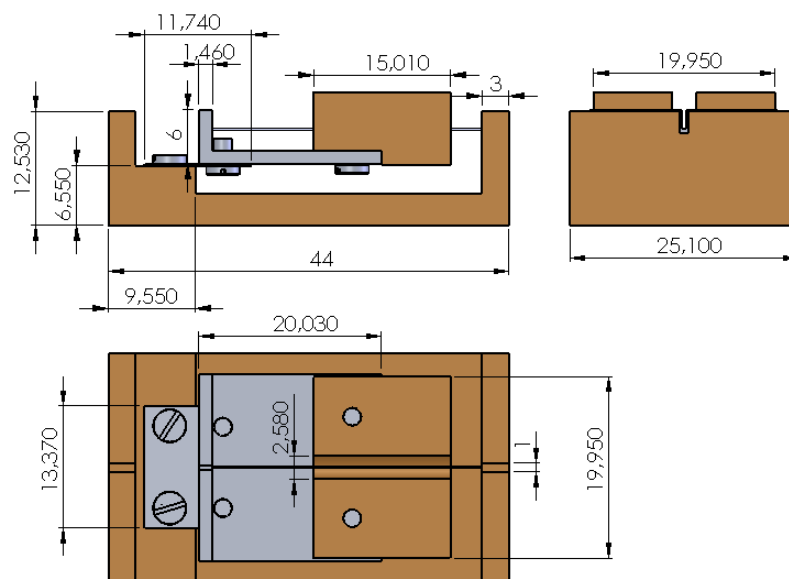


Figura 4.4: Dimensões, em milímetros, do acelerómetro modelo V1 implementado.

A malha de elementos finitos adoptada no modelo encontra-se esquematizada na figura 4.5.

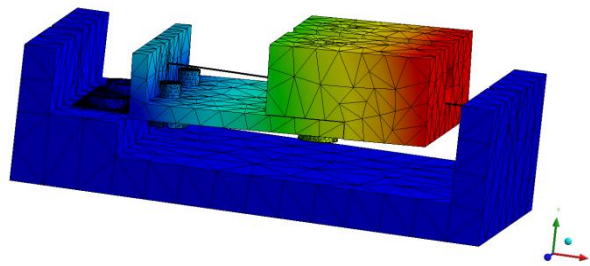


Figura 4.5: Malha de elementos finitos usada na simulação do acelerómetro V1 com o programa *Ansys*®.

O modelo é composto por 50739 elementos tetraédricos, sendo mais refinado na região com maior concentração de solicitações, neste caso na lâmina de aço. De modo a simular a pré-tensão imposta à fibra óptica, aplicou-se uma variação de temperatura de $-4000\text{ }^{\circ}\text{C}$, e considerou-se apenas o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica como não nulo (com um valor de $5 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). O modelo foi sucessivamente refinado, em termos de dimensões dos seus elementos, até que o valor da frequência própria convergisse, definindo-se um tamanho máximo de 0.1 mm para cada elemento da lâmina de aço. Deste modo obteve-se uma frequência própria de 51.32 Hz, que em comparação com o valor obtido experimentalmente apresenta um erro de 9.73 %. Na figura 4.6 apresenta-se o espectro de frequências obtido com recurso ao modelo numérico, que permite obter o valor da frequência própria do acelerómetro.

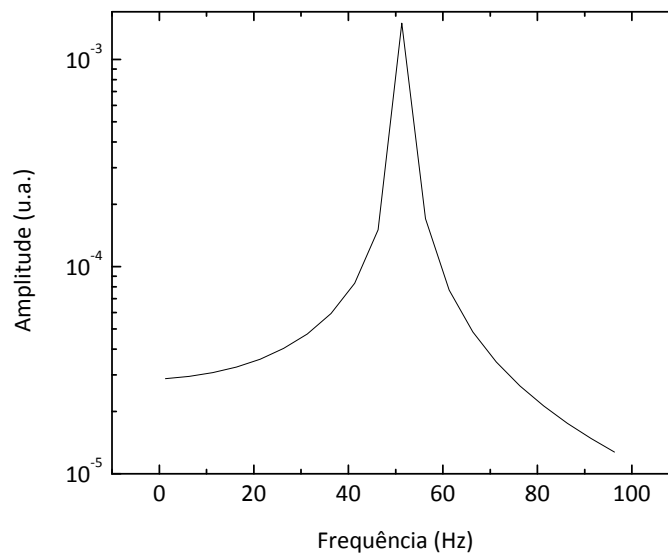


Figura 4.6: Espectro de frequências obtido numericamente.

A diferença entre o valor estimado numericamente e o valor obtido experimentalmente pode ser explicada tendo em conta que o protótipo apresenta determinadas imperfeições na sua

construção que não foram reproduzidas no modelo, bem como diferenças entre os valores médios das propriedades físicas dos materiais envolvidos e os valores considerados no modelo numérico.

Confirmou-se que a simulação é uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novos sensores, permitindo otimizar e adaptar o sensor à aplicação desejada, sem custos adicionais relacionados com a produção. Deste modo, foi utilizada esta estratégia na optimização dos novos acelerómetros desenvolvidos neste trabalho, que serão apresentados nas secções seguintes.

4.3 ACELERÓMETRO V2

O segundo acelerómetro estudado, modelo V2, teve como base o acelerómetro V1, no entanto foram melhorados vários aspectos.

Na referência [1] concluiu-se que a frequência própria do acelerómetro V1 era demasiado reduzida, influenciando o desempenho do dispositivo no que respeita à variação de sensibilidade com a frequência do sinal medido, recomendando-se o seu aumento de modo considerável. Este aumento foi proporcionado pela alteração das dimensões físicas das componentes do sensor, nomeadamente pela alteração das dimensões do *cantilever* e da massa inercial. O acelerómetro foi assim melhorado em relação à versão anterior construída. Para além do aumento da frequência de ressonância, adaptou-se um sistema de fixação que permite mudar a fibra e tensioná-la de modo fácil no local de instalação e implementou-se ainda um sistema de bloqueamento da massa inercial que limita o seu movimento e permite assim o transporte do acelerómetro sem risco de quebra da fibra. Para melhorar as condições de instalação, aumentou-se a base de apoio, a qual contém furos para a fixação do acelerómetro à estrutura a monitorizar, e construiu-se uma tampa de protecção para proteger o sistema dinâmico das condições atmosféricas.

4.3.1 SIMULAÇÃO

O acelerómetro, na sua essência, é constituído por uma base em latão, um *cantilever* de alumínio, uma lâmina de aço, uma massa inercial de latão, e pela fibra óptica onde está gravada uma rede de Bragg. Na figura 4.7 apresenta-se um esquema do acelerómetro proposto, bem como as dimensões utilizadas na simulação.

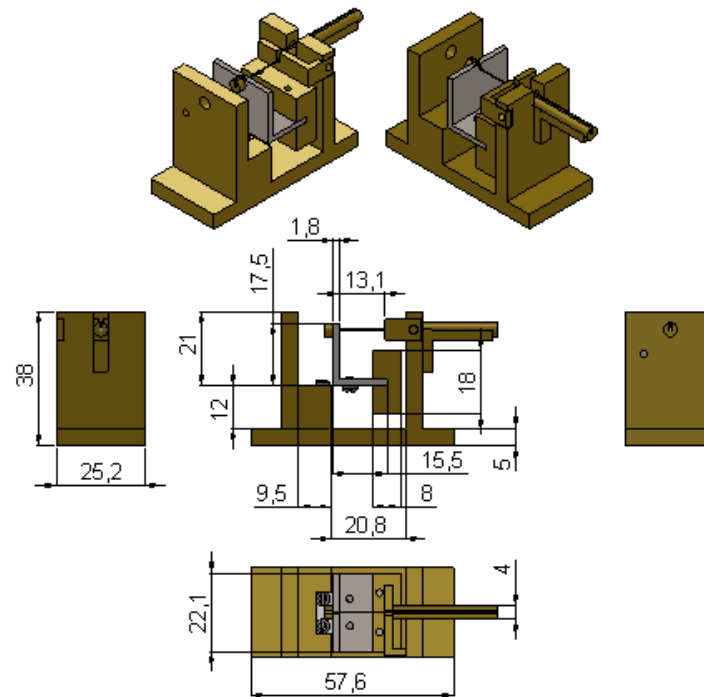


Figura 4.7: Dimensões, em milímetros, do acelerómetro V2 implementado.

Na figura 4.8 apresenta-se a malha de elementos finitos considerada na simulação, utilizando o software *Ansys*®, versão 11.

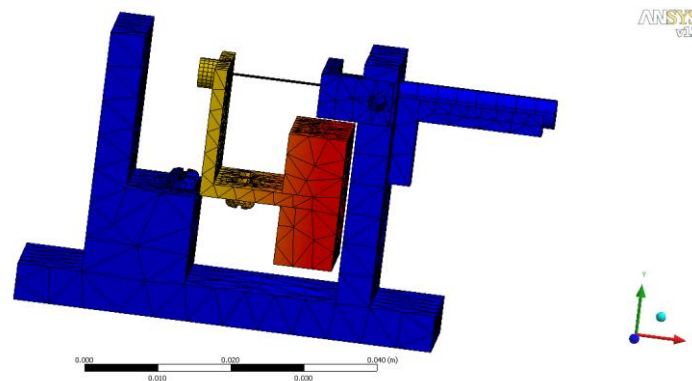


Figura 4.8: Modelo de elementos finitos usado na simulação do acelerómetro V2 com o programa *Ansys*®.

O modelo numérico de simulação é constituído por 168425 nós e 33171 elementos tetraédricos, sendo mais refinado na região que mais controla a resposta do sensor, neste caso a lâmina de aço, com uma dimensão máxima de elemento de 0.1 mm. A pré-tensão imposta à fibra óptica foi simulada pela aplicação de uma variação de temperatura de -4000 °C, considerando apenas o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica como não nulo (com um valor de $5 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Na figura 4.9 encontra-se representado o espectro de frequências, obtido por simulação, o qual permite obter o valor da frequência própria do acelerómetro modelo V2. Tal como se pretendia,

obteve-se um valor de 149.56 Hz para a frequência própria do acelerómetro, cerca de três vezes superior ao valor correspondente para o acelerómetro modelo V1.

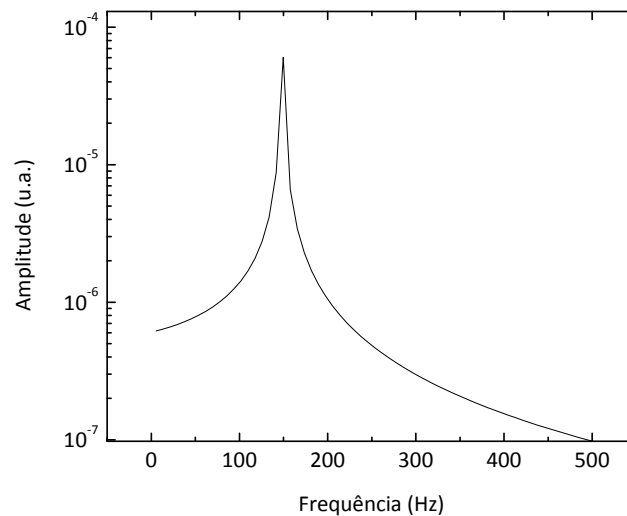


Figura 4.9: Espectro de frequências obtido através da simulação.

4.3.2 IMPLEMENTAÇÃO FINAL E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

O acelerómetro modelo V2 foi construído tendo em conta as dimensões optimizadas com a simulação, sendo composto por uma base, um *cantilever*, uma lâmina de aço, uma massa inercial, dois fixadores da massa que permitem a sua imobilização durante o transporte, um esticador que permite pré-tensionar a fibra óptica, dois cilindros de suporte da fibra, bem como uma fibra óptica onde está gravada uma FBG. A fibra é colada nos dois cilindros de apoio e depois colocada no acelerómetro e pré-tensionada. A fibra óptica, encontra-se colada nos cilindros, permitindo uma fácil troca de fibra óptica no local de instalação, em caso de quebra. Na figura 4.10 apresenta-se o acelerómetro implementado com identificação das partes que o constituem.

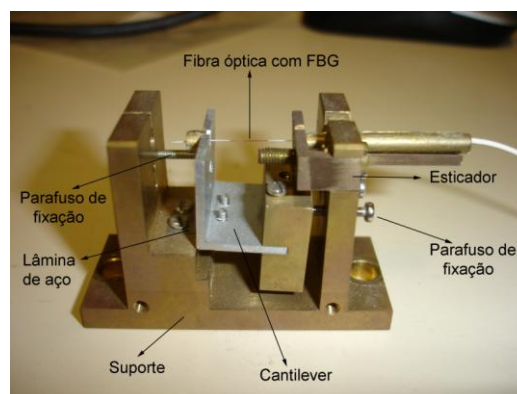


Figura 4.10: Fotografia do acelerómetro modelo V2.

O sensor modelo V2 proposto nesta secção foi caracterizado tendo como objectivo principal a obtenção experimental da sua frequência própria, parâmetro importante na verificação da linearidade do valor da aceleração medida para baixas frequências e na validação do modelo de simulação utilizado. Na figura 4.11 apresenta-se a resposta do sensor à aplicação de impulsos verticais aplicados sobre a massa inercial.

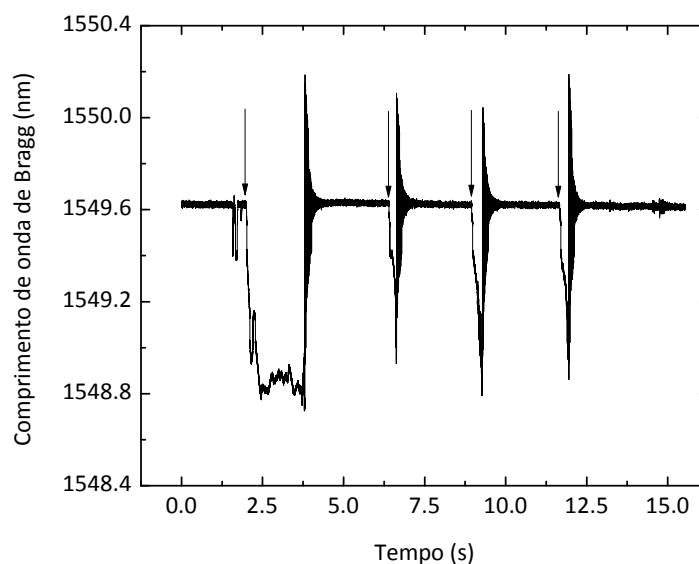


Figura 4.11: Resposta do sensor à aplicação de impulsos sobre a massa inercial.
As setas indicam o instante da aplicação dos impulsos.

Na figura 4.12 apresenta-se o espectro de frequências obtido pela aplicação da transformada de Fourier aos dados da figura 4.11. A partir do espectro de frequências é possível obter a frequência própria do acelerómetro.

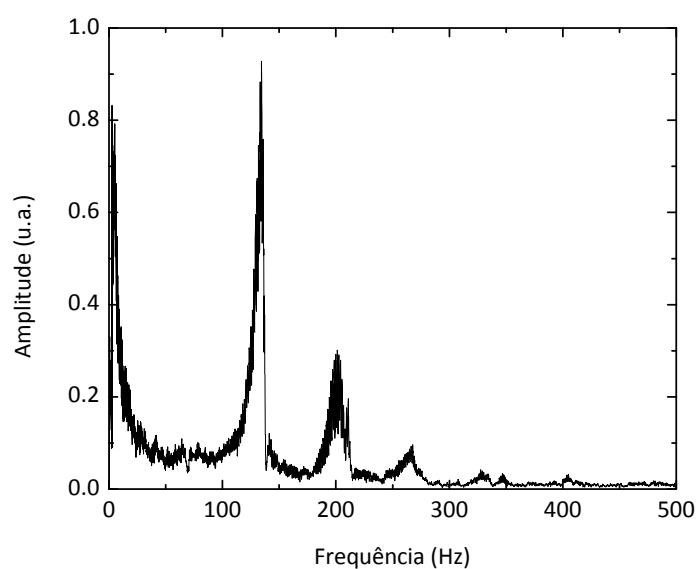


Figura 4.12: Espectro de frequências dos dados representados na figura 4.11.

Obteve-se um valor de 137.39 Hz para a frequência própria do acelerómetro modelo V2. Este valor representa uma diferença de 8.86 %, relativamente ao valor previsto pela simulação numérica baseada em elementos finitos. A diferença encontrada apresenta um valor aceitável, tendo em conta a complexidade da montagem e a quantidade de peças amovíveis, tais como os parafusos de fixação da massa inercial para transporte. Verifica-se a existência de picos secundários no espectro de frequências que poderão ser resultado da complexidade da montagem do sensor e à já referida quantidade de peças amovíveis.

O sistema de interrogação utilizado para medir a resposta do acelerómetro foi desenvolvido e é reportado na referência [1], e a sua estrutura de funcionamento encontra-se ilustrada na figura 4.13. Deste modo, a sensibilidade do sistema proposto depende da sensibilidade do acelerómetro e dos estágios de amplificação do sistema de interrogação. O sistema de interrogação tem como base a transmissão do sinal reflectido pela rede de Bragg do acelerómetro por um filtro óptico com elevada largura espectral. A variação da posição espectral do valor máximo de reflectividade da rede de Bragg resulta numa alteração da potência óptica à saída do filtro. Quando a rede de Bragg está sujeita a perturbações externas, a posição espectral do sinal reflectido altera-se e a potência óptica à saída do filtro óptico varia em função do integral de convolução da resposta espectral do filtro óptico e do sinal reflectido pela rede de Bragg. A saída do filtro encontra-se ligada a um fotodetector que converte o sinal óptico numa corrente eléctrica, sendo convertido num sinal de tensão eléctrica por um amplificador de transimpedância. A região de operação de um sistema deste tipo está limitada pela largura espectral do filtro óptico e pela elongação máxima permitida à fibra óptica.

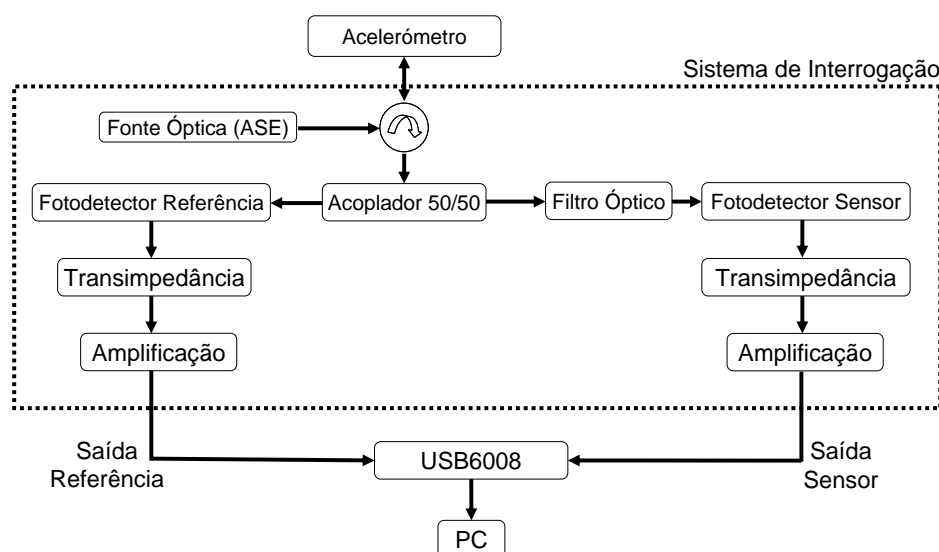


Figura 4.13: Sistema de interrogação utilizado [1].

O sistema foi calibrado com recurso a um acelerómetro de referência, modelo CLX02LF1Z, da *Crossbow Technology*, com uma sensibilidade de 0.997 V/G. O valor do ganho após os fotodetectores do sistema de interrogação foi ajustado de modo a igualar o sinal dos sensores óptico e electrónico, expondo os dois sensores a uma aceleração externa aleatória semelhante. Assim, a sensibilidade do sistema óptico será semelhante à sensibilidade do acelerómetro electrónico, apresentando um valor de 0.997 V/G. Os acelerómetros óptico e electrónico foram colocados sobre um oscilador mecânico, controlado por um gerador de sinal, modelo GX239 da *Metrix*, de modo a estarem expostos ao mesmo valor de aceleração externa. A calibração foi efectuada para uma frequência de 10 Hz, e os resultados obtidos são mostrados na figura 4.14 (topo). Foi também efectuada a caracterização a 20 Hz, de modo a verificar a variação da sensibilidade com a frequência, cujos resultados são apresentados na figura 4.14 (baixo).

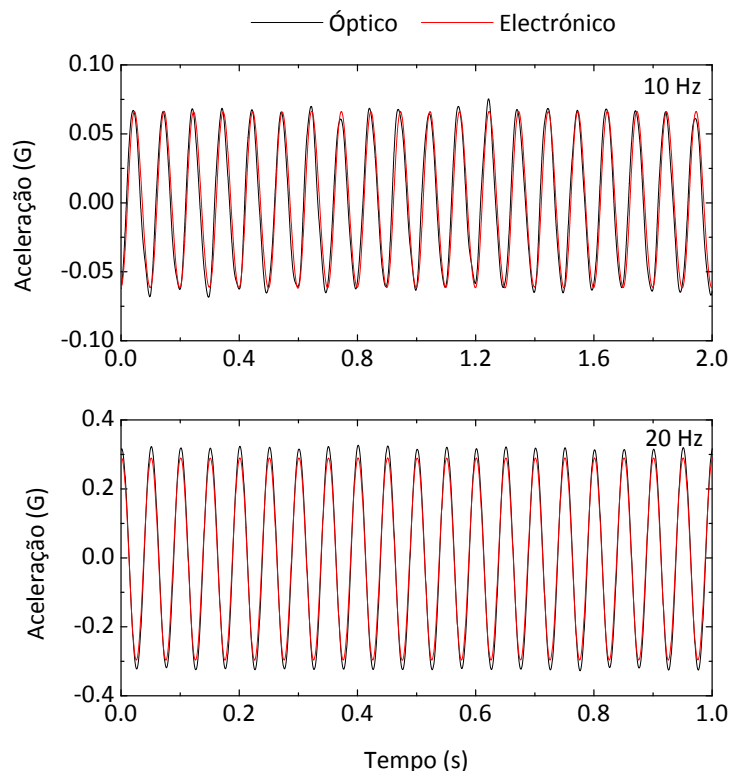


Figura 4.14: Resposta do sistema óptico implementado e do acelerómetro electrónico de referência para uma aceleração externa cíclica com frequência de 10 Hz (em cima) e 20 Hz (em baixo).

Verifica-se que a variação da sensibilidade não é significativa para acelerações com frequência até 20 Hz, pelo que o sistema implementado corresponde às expectativas iniciais, tendo em vista a sua aplicação em problemas de monitorização de estruturas correntes.

4.4 ACELERÓMETRO V3

A terceira versão desenvolvida, modelo V3, tem como base as versões anteriores, no entanto optou-se pela eliminação de todas as juntas de contacto, construindo-se o acelerómetro a partir de uma única peça de latão, a qual foi maquinada. Deste modo eliminaram-se as contribuições parasitas associadas à flexibilidade das ligações e optimizou-se o processo de implementação. Tendo em conta o custo associado a um sistema de interrogação capaz de adquirir o sinal de um sensor dinâmico, optou-se pelo desenvolvimento de um sensor cujas redes de Bragg fossem utilizadas como elementos sensores e, simultaneamente, como elementos do sistema de interrogação.

4.4.1 DESCRIÇÃO DO SENSOR

O acelerómetro de fibra óptica implementado é também baseado na tecnologia de redes de Bragg, utilizando duas FBGs em posições opostas. O acelerómetro foi fabricado a partir de uma única peça de latão e a sua estrutura consiste numa massa inercial concentrada, sustentada por uma viga *cantilever* em forma de L, ligada à base por um elemento fino (com espessura de 1.1 mm) e por duas fibras ópticas com redes de Bragg. Quando exposto à aceleração externa, os movimentos da massa inercial no eixo vertical impõem uma contracção numa rede de Bragg e uma expansão na outra. Na figura 4.15 é ilustrada uma esquematização do acelerómetro e das suas dimensões. A rede de Bragg 1 (FBG1) é fixa entre os pontos identificados pela letra A e a rede de Bragg 2 (FBG2) pelos pontos identificados pela letra B.

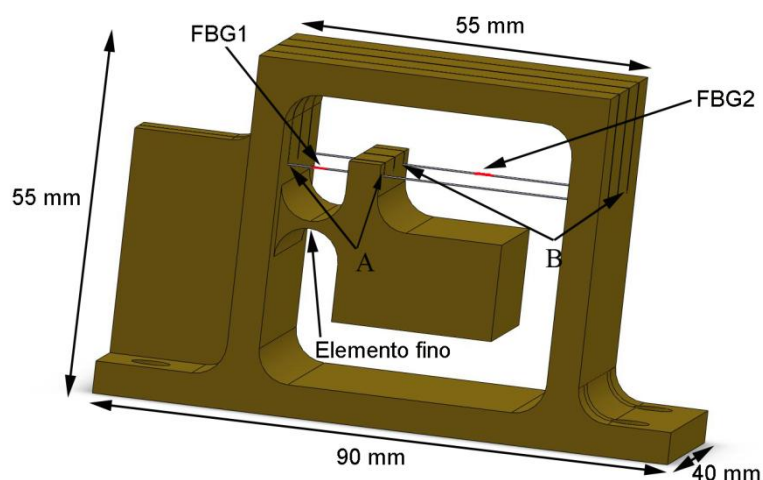


Figura 4.15: Esquematização e dimensões do acelerómetro implementado, modelo V3.

O movimento da massa inercial não ocorre exclusivamente na direcção vertical, mas devido à sua reduzida variação, pode ser considerado como tal. As dimensões do elemento fino de ligação determinam o intervalo de funcionamento e a sensibilidade do acelerómetro, sendo que a sua forma minimiza a sensibilidade cruzada. Este esquema permite que o acelerómetro seja insensível a efeitos de eixo cruzado e minimiza a sensibilidade às variações da temperatura ambiente, pois na presença desses efeitos ambas as redes de Bragg utilizadas são afectadas de igual modo.

O sistema de interrogação, parte integrante do acelerómetro, é esquematizado na figura 4.16. Neste caso aplica-se uma técnica que utiliza as duas redes sensoras para descodificar o sinal das FBGs modulado espectralmente para um sinal modulado temporalmente [3]. Esta técnica emprega duas redes de Bragg em série. A primeira é iluminada por uma fonte óptica de espectro largo e o seu sinal de reflexão é dividido num acoplador 2x2. Parte desse sinal é injectado na segunda rede de Bragg e o restante sinal é utilizado como referência, sendo convertido num fotodetector para o domínio eléctrico. A segunda rede é iluminada pelo espectro de reflexão da primeira rede de Bragg, sendo o sinal reflectido por esta convertido para o domínio eléctrico.

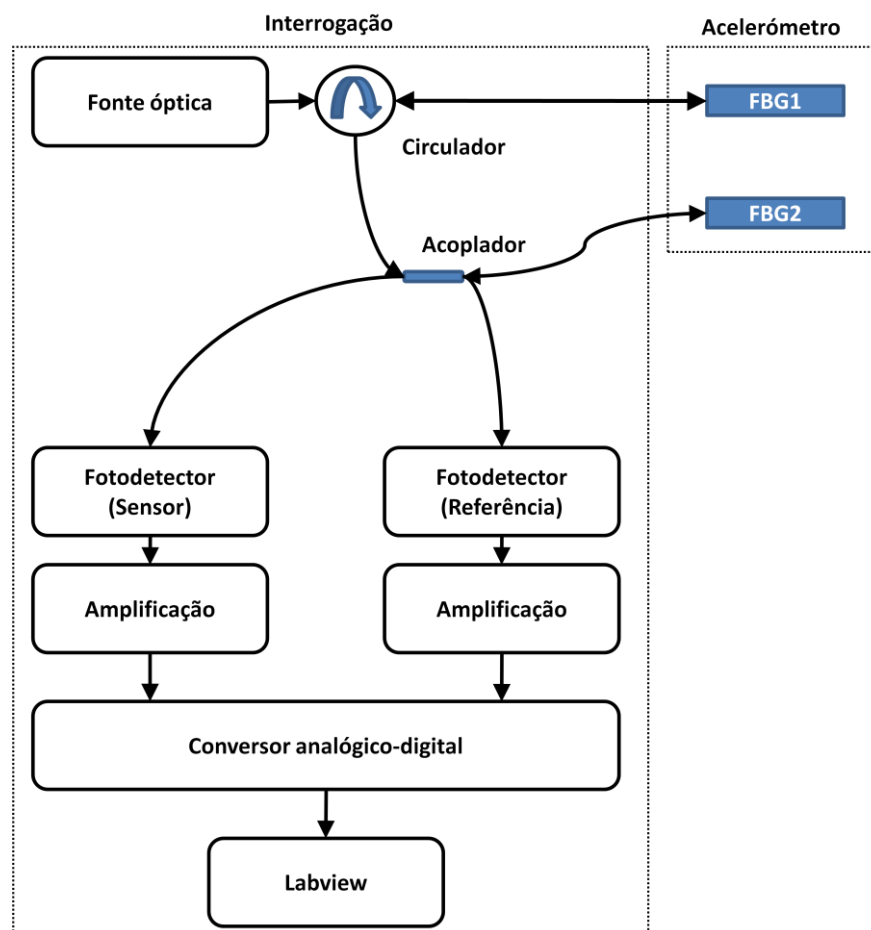


Figura 4.16: Esquema do sistema de interrogação utilizado.

Ambos os sinais eléctricos, o de referência e o sinal reflectido pela segunda rede, são amplificados e convertidos para o domínio digital por uma placa conversora analógico para digital (*Analog to Digital Converter, ADC*) da *National Instruments* (USB6008) a uma taxa de amostragem de 3.3 kHz. Os dois sinais são processados numa aplicação informática em *LabView*, desenvolvida para o efeito, onde o sinal do sensor é dividido pelo sinal de referência, de modo a compensar eventuais flutuações de potência da fonte óptica. Na figura 4.17 mostra-se o espectro das duas redes de Bragg utilizadas e a sua posição espectral quando iluminadas por uma fonte óptica de elevada largura espectral, sendo o sinal do sensor proporcional à convolução dos espectros das duas FBGs.

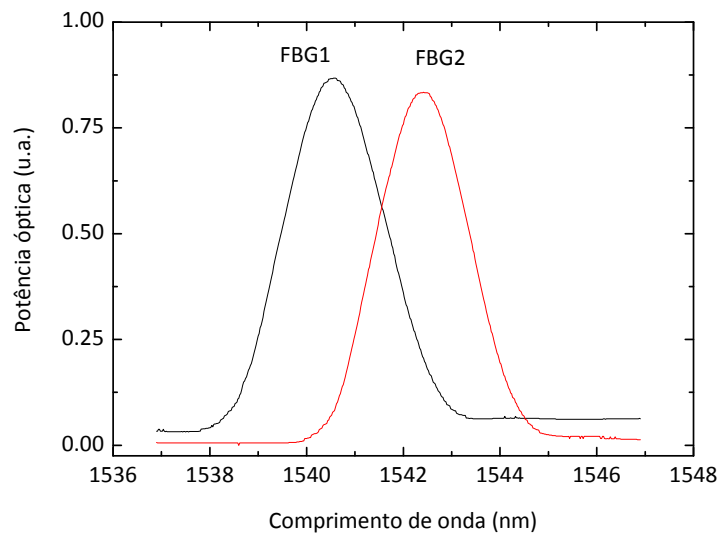


Figura 4.17: Espectro óptico das duas redes de Bragg utilizadas.

Se as duas redes forem afectadas do mesmo modo (variações de temperatura ou rotações devido a acelerações segundo eixos cruzados) será minimizada qualquer alteração do sinal, pois as duas redes sofrerão um desvio do comprimento de onda central de reflexão na mesma direcção. Se a massa inercial se mover, uma rede de Bragg será comprimida enquanto que a outra sofrerá um alongamento, causando uma alteração na intensidade do sinal de saída. O uso do circulador, em vez de um acoplador, é justificado pela necessidade de bloquear o acesso do sinal reflectido pela segunda rede de Bragg à primeira, evitando efeitos de ressonância óptica.

4.4.2 SIMULAÇÃO

Antes de ter sido implementado, o acelerómetro foi simulado de modo a otimizar as suas características, nomeadamente a frequência de ressonância, tendo em conta as dimensões físicas de projecto. Foi utilizada, novamente, a aplicação informática de análise de elementos finitos

Ansys®, versão 11. Esta aplicação permitiu prever a frequência de ressonância do sensor, minimizando custos de produção e economizando tempo. A figura 4.18 apresenta uma imagem do modelo de simulação. A malha de elementos finitos é composta por 129204 nós e 52275 elementos tetraédricos, sendo as áreas mais sensíveis refinadas com uma dimensão máxima de elemento de 0.1 mm. A pré-tensão na fibra óptica foi simulada impondo uma carga térmica ao sistema de -2000 °C, considerando o coeficiente de expansão térmica do suporte de latão como zero e um valor de $5 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ para o coeficiente de expansão térmico da fibra óptica. Os cálculos com esta simulação tiveram uma duração de cerca de 4 horas num computador com um processador de 2.2 GHz e 3 GB de memória RAM.

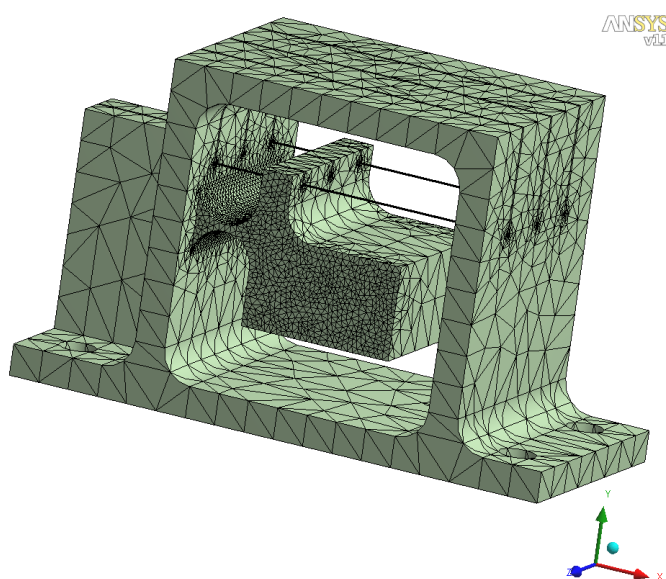


Figura 4.18: Malha de elementos finitos adoptada no modelo de simulação.

O espectro de frequências, obtido por simulação, encontra-se representado na figura 4.19, prevendo uma frequência própria do acelerómetro de 344.0 Hz.

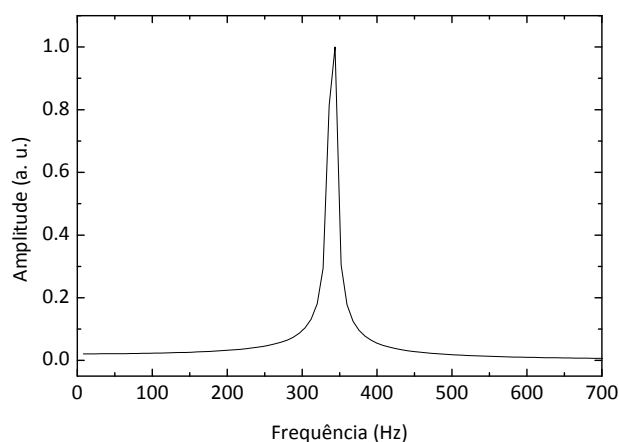


Figura 4.19: Espectro de frequências do acelerómetro V3, obtido através de simulação.

4.4.3 IMPLEMENTAÇÃO FINAL E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

Tendo em conta os resultados da simulação, que se consideraram ideais para a monitorização estrutural, procedeu-se à implementação do sensor com as dimensões consideradas no modelo de elementos finitos (figura 4.15). A figura 4.20 mostra uma fotografia do acelerómetro modelo V3 implementado.

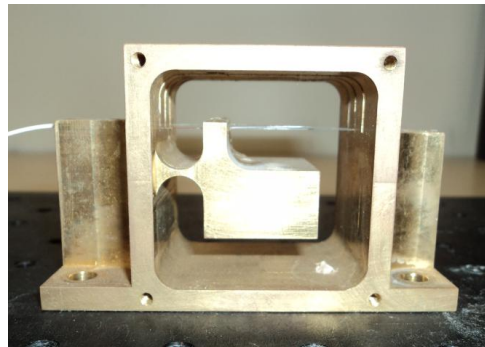


Figura 4.20: Acelerómetro implementado, modelo V3.

Com o primeiro teste pretendeu-se validar os resultados do modelo de simulação. Para isso foi aplicada uma carga vertical sobre a massa inercial que depois se removeu subitamente, deixando a massa inercial a oscilar com a sua frequência própria. Medindo a resposta do sensor obtém-se a sua frequência própria, através da aplicação da transformada de Fourier aos dados ao longo do tempo. Na figura 4.21 mostra-se a tensão medida à saída do sistema de interrogação ao longo do tempo, durante a aplicação de uma carga vertical e a sua remoção. Este procedimento foi repetido duas vezes.

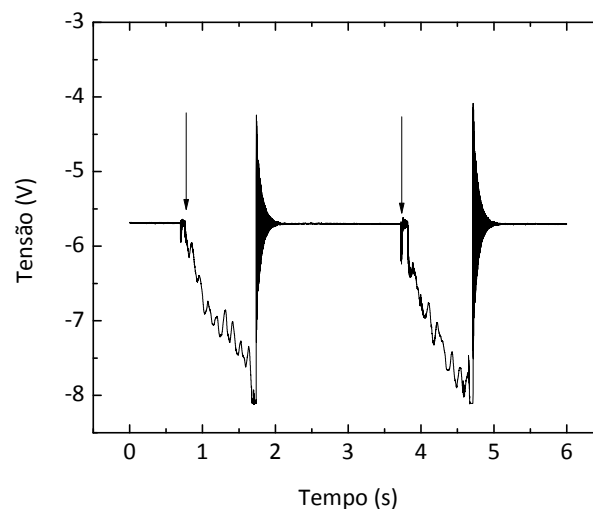


Figura 4.21: Evolução temporal da tensão à saída do sistema de interrogação. As setas indicam o instante da aplicação da carga vertical.

A transformada de Fourier dos dados da figura 4.21 permite obter a resposta em frequência do sensor, que se apresenta na figura 4.22. Na mesma figura mostra-se também a resposta em frequência obtida na simulação descrita na secção anterior.

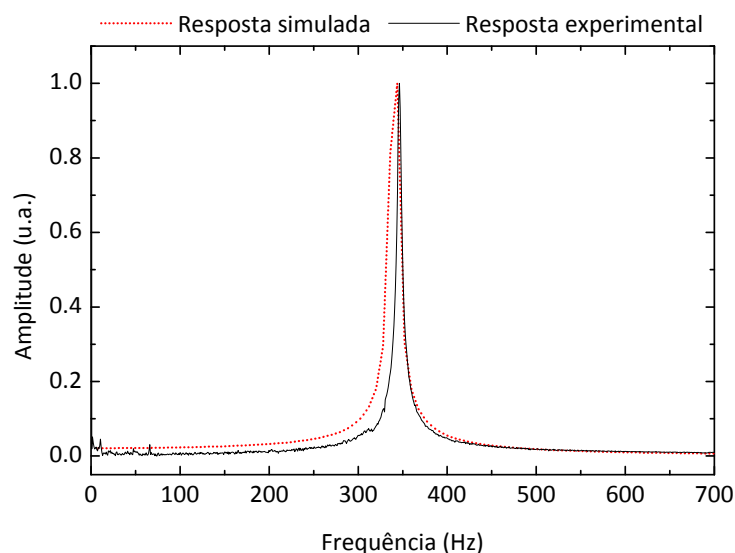


Figura 4.22: Espectro de frequências obtido experimentalmente (linha contínua) e por simulação (linha a tracejado).

Verificou-se que o valor máximo do espectro de frequências previsto pela simulação ocorre para uma frequência de 344.9 Hz e o valor experimental para uma frequência de 346.5 Hz, que corresponde a um erro relativo de 0.73 %. Conclui-se que o modelo de simulação previu com rigor as propriedades do protótipo, confirmando o interesse da utilização da simulação numérica na redução do tempo de implementação e custos associados à produção de sucessivos protótipos com características diferentes das desejadas. Adicionalmente, verifica-se que a remoção de todas as peças amovíveis permite obter um espectro de frequências apenas com um máximo na frequência própria do sensor, eliminando frequências parasitas que se verificaram nos protótipos anteriores.

Tal como já foi referido, o sistema de interrogação é composto por um estágio de amplificação. Este estágio de amplificação permite o ajuste do ganho do sinal. Utilizando um acelerómetro de referência calibrado, modelo CLX02LF1Z, da *Crossbow Technology*, com uma sensibilidade de 0.997 V/G, ajustou-se o valor do ganho do estágio de amplificação de modo a igualar o valor do sinal dos sensores óptico e electrónico, expondo os dois sensores a uma aceleração externa

aleatória. Deste modo a sensibilidade do sistema óptico (acelerómetro e sistema de interrogação) será semelhante à sensibilidade do acelerómetro electrónico.

4.4.4 APLICAÇÃO DE TESTE

Após o processo de implementação, o sensor e sistema de interrogação foram testados em medidas efectuadas no edifício do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Simultaneamente, foi utilizado o acelerómetro electrónico como referência. Os acelerómetros, óptico e electrónico, foram rigidamente acoplados a uma placa metálica (≈ 5 kg), assumindo-se que com esta massa a placa metálica apoiada no edifício acompanha os deslocamentos e acelerações do edifício no ponto de medida.

O ponto de medida corresponde ao centro de uma laje com geometria rectangular de betão armado com 6 m de vão, no segundo andar do edifício. Na figura 4.23 mostra-se a evolução dos dados de aceleração recolhidos durante 10 s, nos quais foram aplicados 3 impulsos mecânicos através de salto simultâneo de duas pessoas na proximidade do ponto de medida.

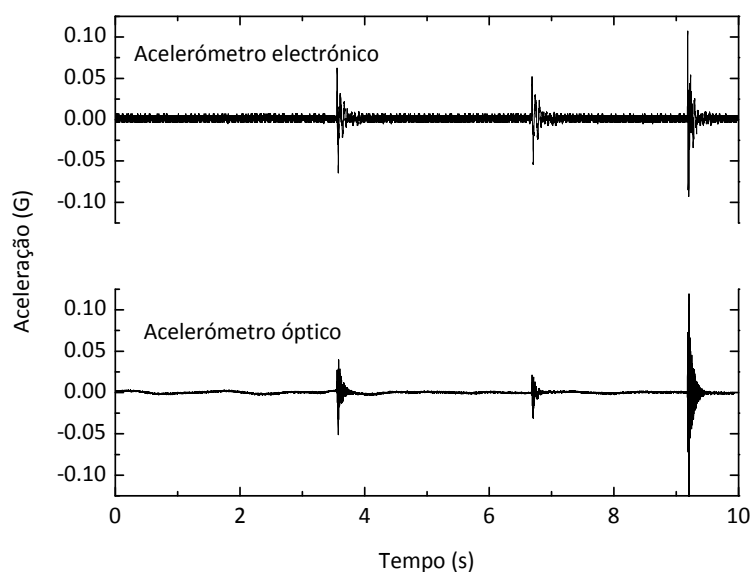


Figura 4.23: Evolução da aceleração registada durante o ensaio.

A transformada de Fourier dos dados de aceleração ao longo do tempo permite identificar as frequências próprias da laje, correspondendo aos picos de maior amplitude do espectro de frequências. Na figura 4.24 apresenta-se o espectro de frequências dos dados da figura 4.23.

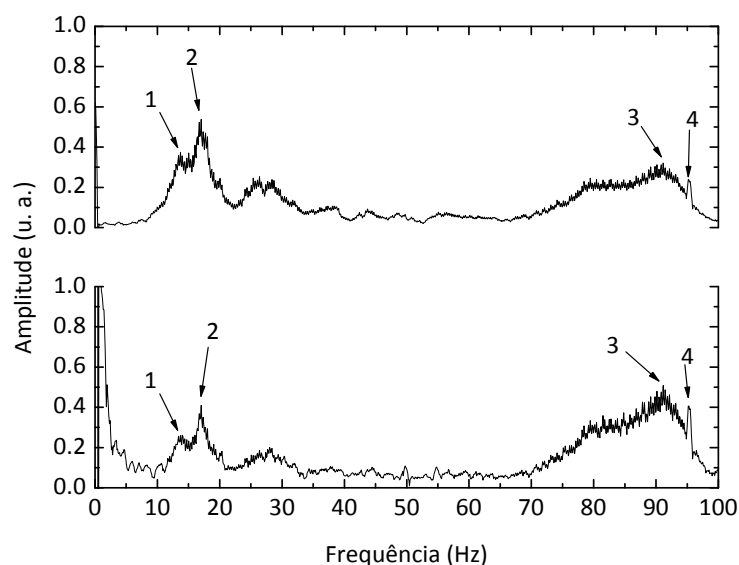


Figura 4.24: Espectros de frequências dos dados de aceleração da figura 4.23, obtidos com o acelerómetro electrónico (no topo) e óptico (em baixo).

A análise dos dados das figuras 4.23 e 4.24 permite verificar o bom desempenho do sensor óptico implementado, que reproduz adequadamente o nível de aceleração e a respectiva resposta em frequência da estrutura. Na tabela 4.1 mostram-se as frequências próprias verticais medidas na laje do edifício do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, obtidas com recurso ao acelerómetro óptico implementado e ao acelerómetro electrónico de referência, bem como o erro relativo entre ambas.

Modo	Frequência (Hz)		
	Electrónico	Óptico	Erro relativo (%)
1	13.698	13.663	0.250
2	17.021	17.010	0.068
3	91.150	91.093	0.063
4	95.179	95.301	0.129

Tabela 4.1: Frequências próprias verticais obtidas com os sensores electrónico e óptico e erro relativo entre ambas.

Verificou-se que o erro relativo entre os valores das frequências próprias obtidos com recurso ao sensor óptico e com o sensor electrónico apresenta um valor máximo de 0.25 %. Deste modo, é possível afirmar que o acelerómetro implementado possui as características necessárias à sua inclusão em sistemas de monitorização estrutural dinâmica, com baixo erro na determinação das frequências próprias.

4.5 ACELERÓMETRO BIAXIAL

As estruturas de engenharia apresentam modos fundamentais de vibração em direcções distintas e modos que mobilizam várias direcções de deslocamento. Deste modo, na sua caracterização é importante o recurso a sensores multidireccionais, capazes de medir a aceleração em várias direcções. Nesta secção apresenta-se o desenvolvimento e caracterização de um sensor biaxial, baseado em redes de Bragg, capaz de medir aceleração e inclinação em duas direcções ortogonais, com insensibilidade à temperatura e ao efeito de eixo cruzado, provocado pelo efeito da aceleração na direcção ortogonal ao eixo de medida. O sensor proposto apresenta-se como uma solução simples e de baixo custo, demonstrando a sensibilidade adequada para as aplicações propostas.

4.5.1 DESCRIÇÃO DO SENSOR

O sensor proposto é composto por duas peças de alumínio maquinadas, ligadas na base por quatro parafusos e no topo por quatro redes de Bragg, tal como apresentado na figura 4.25. As fibras ópticas, com as redes de Bragg, foram fixas entre os dois suportes com cola de cianoacrilato e pré-tensionadas [4].

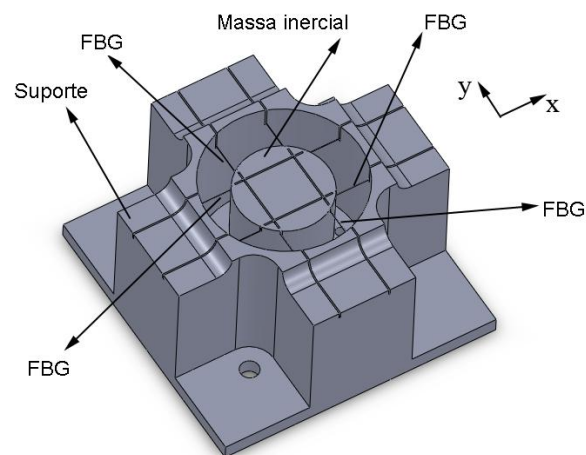


Figura 4.25. Esquema do acelerómetro biaxial implementado.

A peça de alumínio central apresenta uma secção cilíndrica com 4 mm de diâmetro na sua parte inferior, como ilustrado na figura 4.26. No topo a peça tem também uma forma cilíndrica com um diâmetro de 50 mm, formando a massa inercial do acelerómetro, que, com uma excitação, se

move livremente segundo as direcções dos eixos identificados como x e y . Este movimento da massa inercial, permitido para duas direcções, provoca uma contracção/alongamento nas fibras ópticas. Esta variação do comprimento das fibras ópticas induz uma alteração no comprimento de onda central reflectido por cada uma das redes de Bragg, que pode ser relacionado com a aceleração externa na base do acelerómetro [5]. Neste caso, a aceleração é obtida pela diferença de variações de comprimento de onda do sinal reflectido pelas duas redes de Bragg correspondentes a cada direcção.

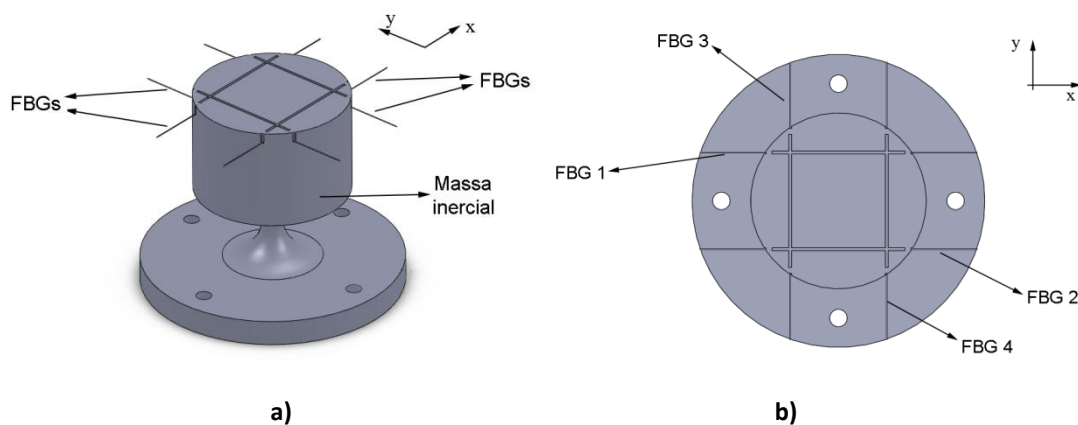


Figura 4.26: Esquema da peça central de alumínio do acelerómetro: a) perspectiva e b) vista de topo.

Considerando uma aceleração ao longo do sentido positivo do eixo x , esta originará um alongamento na rede de Bragg FBG 1 e uma contracção na rede FBG 2 (ver figura 4.26 b)). A variação total dos comprimentos de onda de Bragg será dada pela diferença entre a variação de comprimento de onda sofrida pela rede FBG 1 e pela rede FBG 2. Deste modo a sensibilidade é duplicada, pois é considerada a diferença entre a variação dos comprimentos de onda reflectidos pelas duas redes de cada direcção, que se alteram em sentidos espectrais opostos.

Assumindo uma variação de temperatura, dado que todas as redes de Bragg foram inscritas em fibra óptica idêntica e apresentam a mesma sensibilidade térmica, a variação de comprimentos de onda sofrida por todas as redes será semelhante, sendo a diferença de comprimentos de onda, para cada par de redes numa direcção, nula. Deste modo, o acelerómetro proposto é insensível a variações de temperatura ambiente. Dada a sua insensibilidade à temperatura, o acelerómetro poderá ser utilizado em medidas de baixa frequência, tais como variações angulares relativamente à sua base.

Assumindo uma aceleração externa na direcção coincidente com o eixo y , dado que todas as redes de Bragg são inscritas no mesmo tipo de fibra e apresentam sensibilidades à deformação

semelhantes, as redes de Bragg utilizadas para medir na direcção do eixo x sofrerão alongamentos semelhantes, pelo que a diferença total de variações de comprimentos de onda de Bragg será nula. Deste modo o acelerómetro é insensível a efeitos de eixo cruzado, provocados pelo efeito da aceleração externa na direcção ortogonal ao eixo de medida.

A figura 4.27 mostra um espectro de potência óptica das quatro redes de Bragg utilizadas no acelerómetro e inclinómetro implementado. As redes de Bragg encontram-se multiplexadas em série na mesma fibra óptica, pelo que o acelerómetro apresenta uma única saída. Refere-se ainda que é possível conectorizar a outra extremidade da fibra óptica de modo a permitir a colocação do sensor no meio de uma rede de sensores multiplexados.

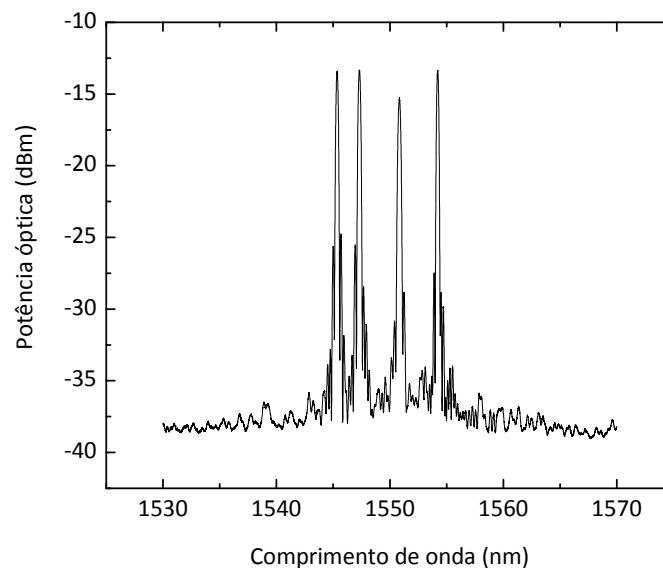


Figura 4.27: Espectro de potência óptica das FBGs usadas no acelerómetro biaxial.

Para garantir a protecção física e aumentar a robustez do acelerómetro, este foi colocado no interior de uma caixa de aço, com dimensões 15 x 15 x 8.5 cm, como se mostra na figura 4.28.



Figure 4.28: Acelerómetro óptico e caixa metálica de protecção.

4.5.2 SIMULAÇÃO

Antes de implementado, o acelerómetro foi simulado com a aplicação informática de simulação *Ansys®*, versão 11, baseado no método dos elementos finitos, nomeadamente na determinação da sua frequência própria. Para a simulação foi considerada a parte central do acelerómetro, tal como se mostra na figura 4.29, considerando as fibras ópticas encastradas nas suas extremidades.

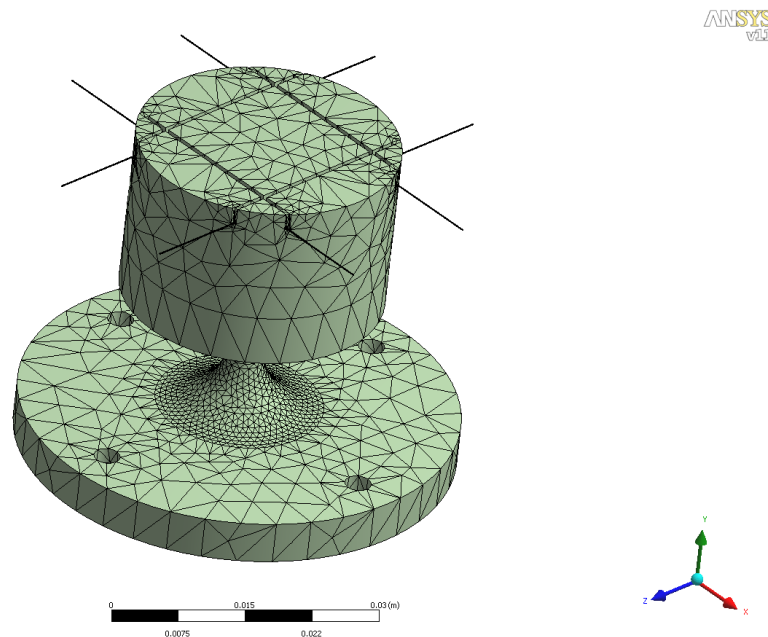


Figura 4.29: Malha adoptada no modelo de elementos finitos para simulação do acelerómetro biaxial.

A pré-tensão nas fibras ópticas foi simulada aplicando uma carga térmica de $-2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, considerando apenas o coeficiente de expansão térmica da fibra óptica como não nulo (foi considerado um valor de $5 \times 10^{-7}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e tendo em conta o valor do módulo de Young da fibra óptica como 69.05 GPa [6].

A malha do modelo consiste em 31989 elementos tetraédricos e 124452 nós. O tempo de simulação foi de aproximadamente 2 horas num computador com processador “dual core” 2.2 GHz e com 3 GB de RAM. A parte inferior do cilindro, que consiste na região mais sensível do acelerómetro, foi refinada sucessivamente nas várias análises até que se verificasse convergência do valor da frequência própria simulada para o seu valor final. Considerou-se uma dimensão máxima de elemento finito de 1 mm para essa mesma região do acelerómetro.

O espectro de frequência obtido por simulação é apresentado na figura 4.30, a partir do qual se pode obter o valor das primeiras frequências próprias do sensor.

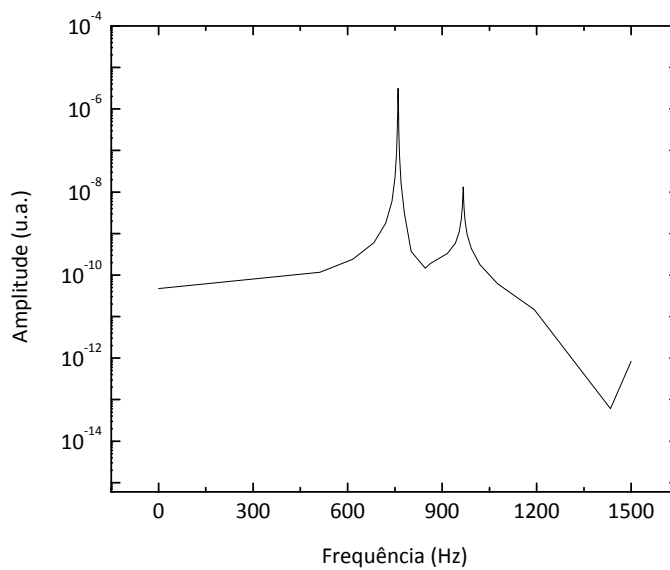


Figura 4.30: Espectro de frequências obtido por simulação.

Verifica-se que no intervalo espectral de 0 até 1500 Hz o sensor apresenta três frequências próprias. A primeira e a segunda frequências são degeneradas e de igual valor, dada a simetria do modelo, apresentando um valor de 759.86 Hz, sendo que cada uma corresponde a um modo de vibração coincidente com os eixos sensíveis do sensor. A terceira frequência própria apresenta um valor de 967.35 Hz e corresponde a um modo de vibração rotacional em torno do eixo do cilindro que forma a massa inercial.

Dados os elevados valores de frequência própria encontrados, é de esperar uma elevada linearidade e estabilidade das medidas a baixas frequências, região onde se espera que ocorram os valores de frequência própria das estruturas correntes de engenharia civil nas quais se pretende aplicar o sensor.

4.5.3 IMPLEMENTAÇÃO FINAL E CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL

O acelerómetro foi implementado com as dimensões consideradas na simulação por elementos finitos, que se apresentam na figura 4.31.

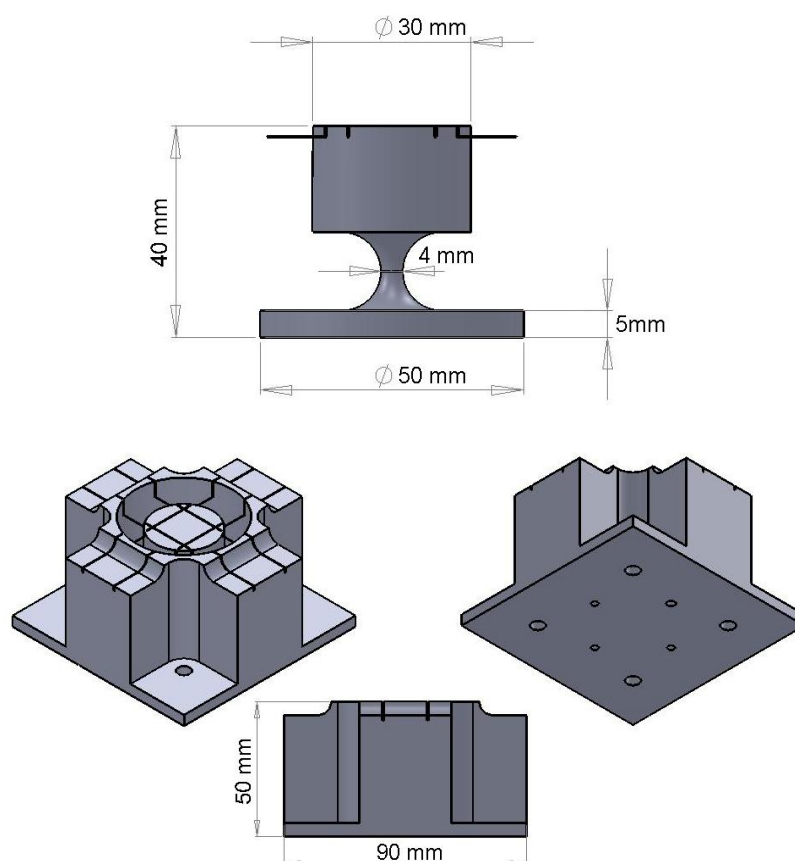


Figura 4.31: Geometria do acelerómetro biaxial implementado, com indicação das dimensões.

A caracterização experimental foi realizada em duas fases. Na primeira determinaram-se as frequências próprias do sensor, possibilitando a sua comparação com o modelo de simulação, e na segunda fase determinou-se a sua sensibilidade. Em qualquer dos casos a caracterização foi realizada para as duas direcções ortogonais em que o sensor é sensível.

Para a determinação das frequências próprias do sensor foi aplicada uma carga lateral sobre a massa inercial, a qual foi retirada subitamente, registando-se a evolução da resposta do sensor. Este procedimento foi também realizado para as duas direcções em que o sensor é sensível.

Na figura 4.32 mostra-se a resposta em frequência do sensor. O sinal óptico do acelerómetro foi medido com recurso a um sistema de interrogação que inclui um circulador óptico, uma fonte óptica de espectro largo (modelo ALS-CL-17-B-FA, da *Amonics*) e um espectrómetro óptico da *Ibsen* (modelo I-MON 80D-R), com uma taxa de amostragem de 2683 Hz.

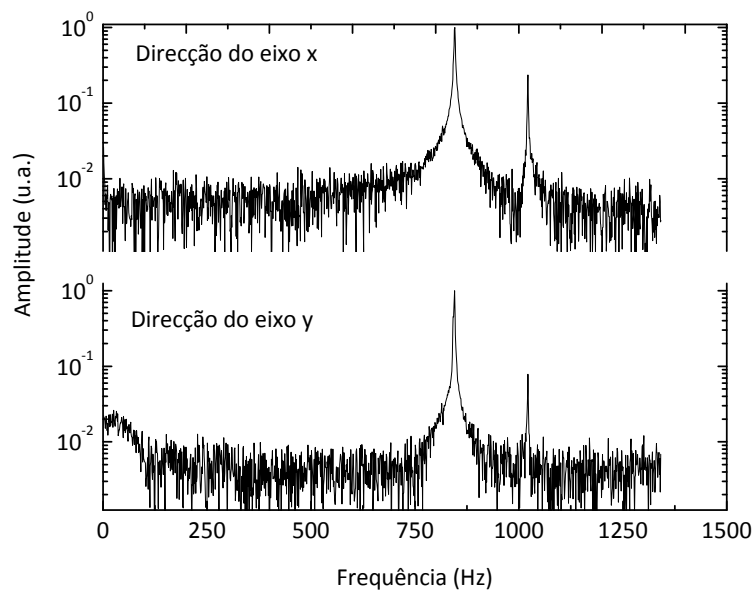


Figura 4.32: Resposta em frequência obtida experimentalmente para uma excitação sobre a direcção do eixo dos x (no topo) e segundo a direcção do eixo y (em baixo).

Experimentalmente verifica-se que existem três frequências próprias no intervalo de frequências de 0 a 1500 Hz. De acordo com o modelo de simulação, a primeira e segunda frequências próprias correspondem aos modos principais, que ocorrem segundo os dois eixos de solicitação, e a terceira frequência corresponde a um modo de vibração rotacional em torno do eixo do cilindro que define a massa inercial. Para as frequências próprias associadas aos modos segundo os eixos sensíveis será de esperar valores ligeiramente diferentes, resultante de imperfeições de produção e montagem. As imperfeições na geometria do sensor fazem com que o mesmo não seja completamente simétrico, tal como considerado no modelo de simulação, onde se verificou um valor semelhante para as duas direcções.

O valor obtido experimentalmente para a primeira frequência própria ao longo do eixo x foi de 846.01 Hz, e para a terceira frequência foi encontrado um valor de 1022.09 Hz. Os valores experimentais apresentam uma diferença percentual de 10.18 % e 5.36 %, relativamente aos valores obtidos numericamente. Para a direcção ao longo do eixo y, mediu-se para a segunda frequência própria um valor de 845.33 Hz, e para a terceira frequência própria obteve-se um valor de 1022.10 Hz. A diferença percentual entre os valores experimentais e simulados, para esta direcção, foi de 10.11 % e 5.36 %, respectivamente para a segunda e terceira frequência própria. Verifica-se que o valor da terceira frequência de ressonância é o mesmo, independentemente do eixo sensível em que se faz a medida.

A diferença entre valores simulados e experimentais deve-se, além de imperfeições de produção e montagem relativamente ao modelo simulado, às propriedades físicas dos materiais componentes que podem apresentar valores ligeiramente diferentes dos valores médios considerados no modelo de simulação. Embora as diferenças entre os valores simulados e experimentais das frequências de ressonância não sejam desprezáveis, especialmente para a primeira frequência própria, o modelo de simulação permitiu o dimensionamento do sensor, reduzindo os tempos de produção e custos associados, evitando a produção de sensores que não apresentassem as características desejadas.

A sensibilidade do sensor, para as duas direcções sensíveis, foi obtida expondo o sensor a uma aceleração aleatória, segundo as duas direcções sensíveis, e o seu sinal comparado com o sinal de um acelerómetro electrónico triaxial calibrado da marca *Summit*, modelo 34201A. Neste ensaio o acelerómetro electrónico foi rigidamente ligado no topo do acelerómetro óptico, de modo a evitar movimentos relativos entre os dois sensores e permitir que se encontrem expostos ao mesmo nível de aceleração externa, como se mostra na figura 4.33.



Figura 4.33: Sensor óptico desenvolvido com o acelerómetro electrónico de calibração acoplado no seu topo.

O sinal do acelerómetro óptico implementado foi medido com recurso a um sistema que compreende uma fonte óptica BT1300 da *Fiberamp Photonetics*, um circulador óptico e um espectrómetro modelo I-MON E, da *Ibsen*, com uma taxa de amostragem de 900 Hz. O acelerómetro electrónico é alimentado por uma pilha de 9 V e o seu sinal adquirido por meio de uma placa ADC da *National Instruments*, modelo USB6008, a uma taxa de amostragem de 900 Hz. As figuras 4.34 e 4.35 mostram os sinais medidos com recurso ao acelerómetro implementado e com o acelerómetro electrónico calibrado. Até aos 25 segundos a aceleração externa é aplicada preferencialmente na direcção do eixo x e dos 25 aos 42 segundos na direcção do eixo y.

Seguidamente, entre os 42 e 52 segundos preferencialmente na direcção do eixo x e no intervalo dos 52 segundos até ao final do ensaio preferencialmente na direcção do eixo y.

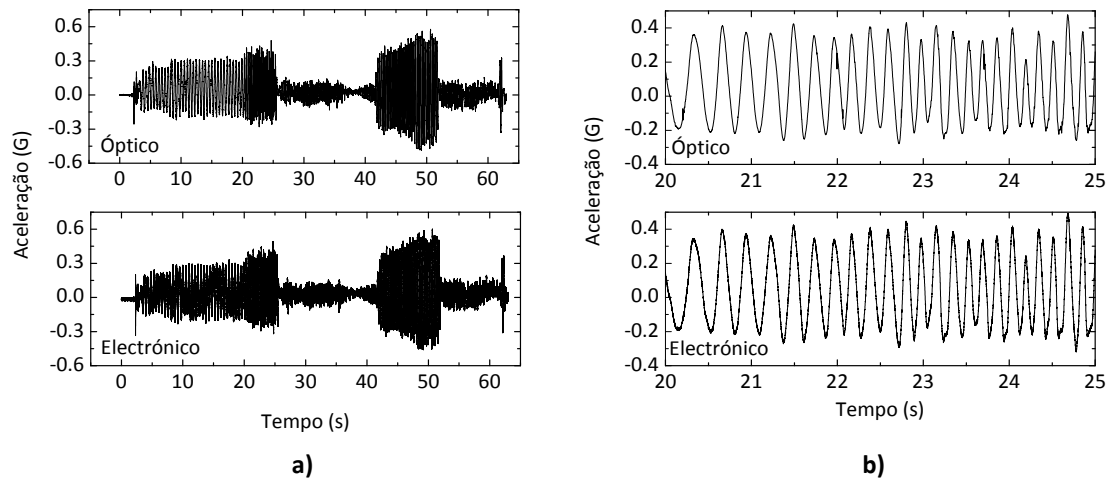


Figura 4.34: Evolução temporal do sinal dos acelerómetros óptico e electrónico medido na direcção do eixo x, quando expostos a uma aceleração externa aleatória. O teste completo é mostrado em a), e no período entre 20 e 25 segundos em b).

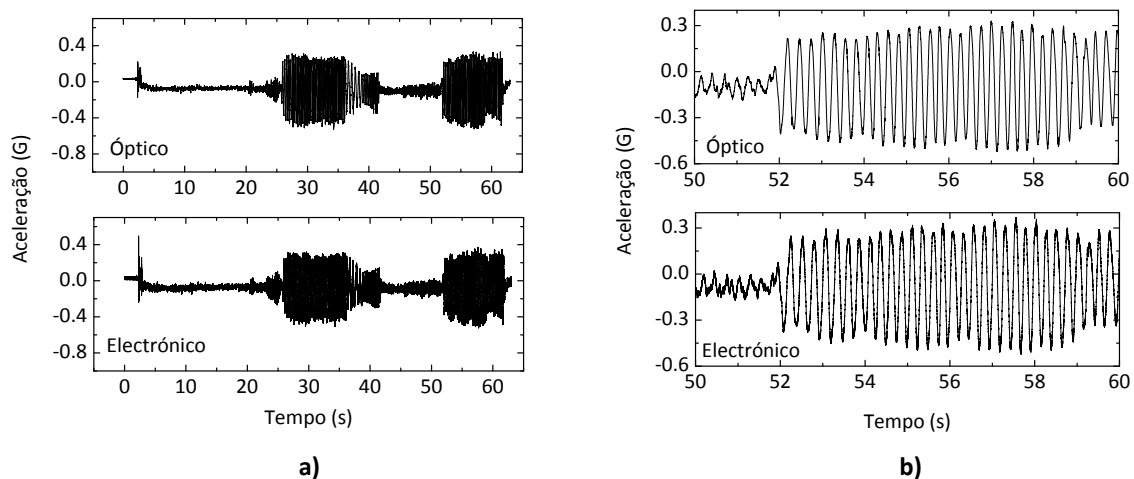


Figura 4.35: Evolução temporal do sinal dos acelerómetros óptico e electrónico medido na direcção do eixo y, quando expostos a uma aceleração externa aleatória. O teste completo é mostrado em a), e no período entre 50 e 60 segundos em b).

Esta caracterização possibilitou comparar directamente o sinal do sensor implementado com o sinal de um sensor calibrado, providenciando uma solução que permitiu obter a sensibilidade do sensor implementado nas duas direcções ortogonais para as quais é sensível. O sinal medido com o acelerómetro óptico segue as variações de aceleração medidas com o acelerómetro calibrado, mostrando um funcionamento adequado do sensor implementado. Foram obtidas sensibilidades de 87.848 pm/G e de 92.351 pm/G, respectivamente para as direcções sensíveis do acelerómetro

segundo o eixo x e y. Este valor de sensibilidades é adequado para a monitorização de estruturas correntes de engenharia civil, tal como pretendido [7].

4.5.4 INCLINÓMETRO

O sensor implementado pode ser utilizado como inclinómetro, sendo esta aplicação viável devido à insensibilidade à temperatura ambiente, que permite leituras de parâmetros estáticos.

Ambas as direcções sensíveis foram caracterizadas colocando o sensor em diferentes posições angulares relativamente à base plana de fixação do sensor. Na figura 4.36 apresenta-se o sinal obtido, para ambas as direcções sensíveis, com o sensor óptico em várias posições angulares. O diferencial do valor do comprimento de onda de Bragg das FBGs, representado na figura 4.36, equivale à diferença das variações de comprimento de onda entre as duas redes de Bragg correspondentes a cada direcção. A monitorização de comprimentos de onda das redes de Bragg envolvidas foi realizada recorrendo a um sistema de interrogação modelo sm125 da *Micron Optics*.

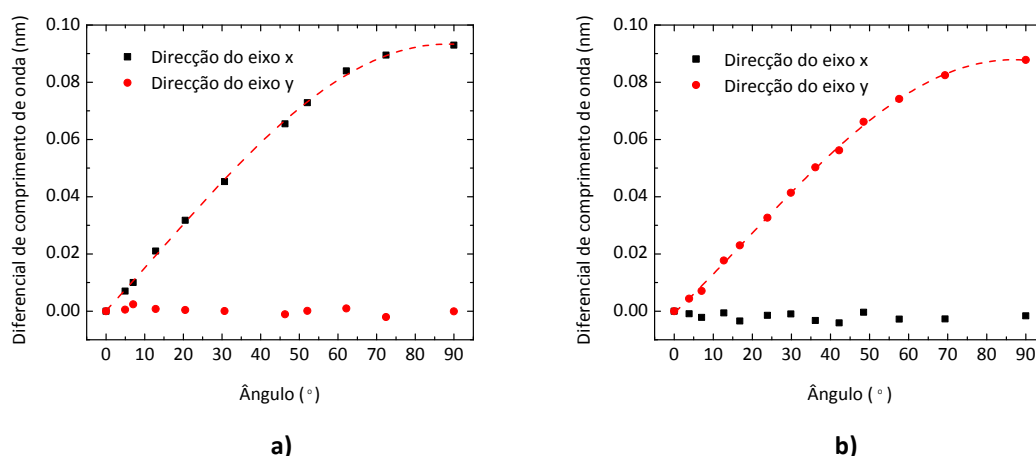


Figura 4.36: Sinal óptico medido em função da posição angular. Em a) a variação angular é aplicada ao longo da direcção do eixo x em b) ao longo da direcção do eixo y.

Os pontos representam os dados experimentais e as linhas as funções sinusoidais ajustadas.

Os dados da figura 4.36 mostram que quando a inclinação é induzida numa direcção, o sinal medido ao longo da direcção ortogonal é nulo, confirmando a insensibilidade do sensor a efeitos de eixo cruzado provocados por perturbações no eixo ortogonal.

O efeito da gravidade deve ser decomposto em duas componentes ortogonais, como se mostra na figura 4.37. Uma dessas componentes é paralela ao eixo sensível do acelerómetro e é

responsável pelo alongamento/contracção da fibra óptica sensível, induzindo uma variação no comprimento de onda de Bragg reflectido pelas redes sensíveis, sendo este medido. A componente da força peso, \vec{P} , paralela ao eixo sensível do sensor, identificada na figura 4.37 por \vec{P}_x , encontra-se relacionada com a força \vec{P} por:

$$\vec{P}_x = \vec{P} \cdot \sin(\alpha_i) \quad (4.1)$$

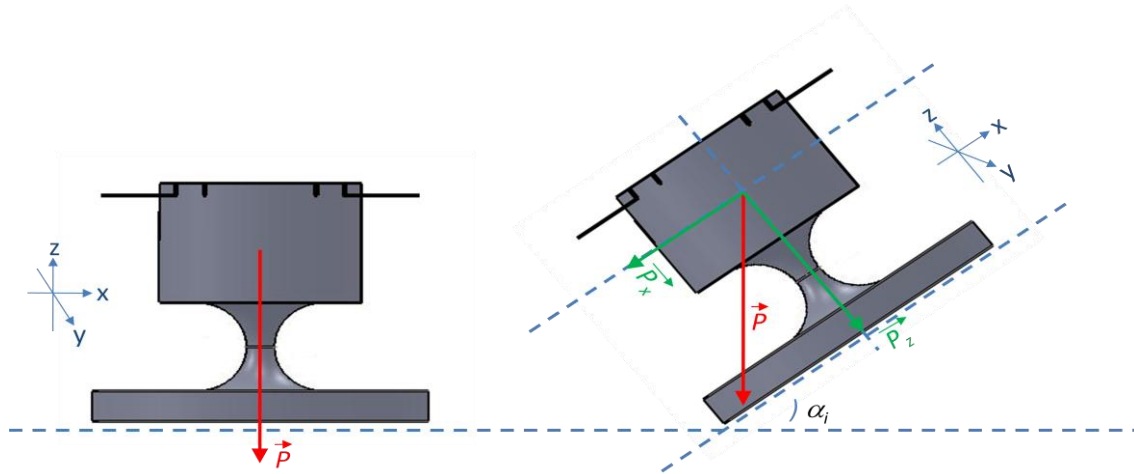


Figura 4.37: Decomposição do efeito da gravidade na massa inercial do inclinómetro.

A sensibilidade à inclinação pode ser obtida por meio de uma lei sinusoidal ajustada aos dados experimentais representados na figura 4.36, para ambas as direcções sensíveis. A equação (4.2) representa a expressão de ajuste utilizada.

$$\Delta\lambda = \Delta\lambda_0 + A \sin\left(\pi \frac{(\alpha_i - \alpha_0)}{w}\right) \quad (4.2)$$

onde $\Delta\lambda$ representa a variação diferencial de comprimentos de onda, $\Delta\lambda_0$ é valor inicial para a variação do comprimento de onda de Bragg das FBGs, A a amplitude da variação, α_i o ângulo de inclinação, α_0 o ângulo inicial e w o período de variação do comprimento de onda de Bragg. Para estes coeficientes foram obtidos os valores apresentados na tabela 4.2, do ajuste aos dados da figura 4.36 para variações angulares nas duas direcções sensíveis.

Coeficiente	Direcção x	Direcção y
α_0 (grau)	13.80	18.57
w (grau)	149.26	136.73
A (pm)	70.00	60.00
$\Delta\lambda_0$ (pm)	20.00	20.00

Tabela 4.2: Coeficientes de ajuste para a expressão (4.2).

No caso de pequenas variações angulares (menores que 45 °), a sensibilidade à inclinação, para as duas direcções de medida, pode ser ainda obtida por um ajuste linear aos dados da figura 4.36. Neste caso, as sensibilidades angulares obtidas deste modo foram de $1.43 \pm 0.03 \text{ pm.grau}^{-1}$ e $1.38 \pm 0.03 \text{ pm.grau}^{-1}$, respectivamente para as direcções ao longo do eixo x e y.

Para medidas de variações angulares precisas, ou desvios superiores a 45 °, o desvio angular deve ser obtido aplicando a expressão (4.3), obtida da expressão (4.2) e utilizando os coeficientes da tabela 4.2.

$$\alpha_i = \alpha_0 + \frac{w}{\pi} \arcsen\left(\frac{\Delta\lambda - \Delta\lambda_0}{A}\right) \quad (4.3)$$

4.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo descreveu-se o processo de simulação e implementação de três protótipos unidireccionais e um bidireccional de sensores ópticos de aceleração. Na fase de concepção e projecto dos sensores foi simulado o seu comportamento, como estratégia de redução de custos e tempo. Os resultados experimentais validaram os modelos de simulação baseados no método de elementos finitos.

As soluções desenvolvidas apresentam características adequadas para a sua aplicação na monitorização de estruturas, tal como se mostra nos capítulos seguintes.

4.7 REFERÊNCIAS

- [1] P. Antunes, "Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg", Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- [2] ANSYS, Inc. (2011). Available: <http://www.ansys.com/>
- [3] R. Cazo, J. L. d. S. Ferreira, T. d. B. Caldas, J. U. d. Arruda, N. Alles and R. C. Louzada, "Improvement of fiber Bragg grating interrogator sensitivity for triaxial accelerometer", *International Microwave & Optoelectronics Conference*, Belém, Brasil, pp. 660-663, 2009.
- [4] P. F. C. Antunes, C. A. F. Marques, H. Varum and P. S. B. André, "Biaxial optical accelerometer and high angle inclinometer with temperature and cross axis insensitivity", *IEEE Sensors Journal*, 2011 (Submetido).

- [5] P. André, P. Antunes and H. Varum, "Acelerómetro e inclinómetro bidimensional óptico baseado em redes de difracção gravadas em fibras ópticas", 2011 (Patente Nacional Pendente).
- [6] P. Antunes, H. Lima, J. Monteiro and P. S. André, "Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres", *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 50, pp. 2467-2469, 2008.
- [7] P. Antunes, H. Lima, N. Alberto, L. Bilro, P. Pinto, A. Costa, H. Rodrigues, J. L. Pinto, R. Nogueira, H. Varum and P. S. André, "Optical sensors based on FBG for structural health monitoring", *New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring*. vol. 1, S. C. Mukhopadhyay, Springer-Verlag, 2011.

Capítulo 5

Monitorização do ensaio de uma parede de adobe com sensores ópticos

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrito o ensaio destrutivo de uma parede de adobe, sendo a monitorização deste teste realizada com medições de parâmetros estáticos e dinâmicos. O ensaio permitiu estudar o comportamento da parede e demonstrar a fiabilidade da utilização de sensores ópticos para a monitorização estrutural. Durante o ensaio foram realizadas medidas estáticas de deformações ocorridas durante a aplicação de uma carga cíclica. Foram ainda realizadas medidas dinâmicas em diferentes instantes temporais que correspondem a diferentes estados de dano da parede, durante o ensaio. A análise dinâmica permitiu estimar a evolução da primeira frequência própria em função da degradação de rigidez da estrutura.

O ensaio estático foi realizado com imposição de deslocamentos horizontais cíclicos, de amplitude crescente, impostos ao nível do topo da parede e até à sua ruptura.

5.2 DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO EXPERIMENTAL

A demonstração da aplicabilidade de sensores ópticos em medidas estáticas e dinâmicas para a monitorização estrutural de infra-estruturas foi realizada com base nos ensaios de uma parede à escala real construída com blocos de adobe. O adobe é um dos mais antigos materiais de construção em todo o mundo. Estima-se que cerca de 30 % da população mundial habite em construções de adobe. Na região centro de Portugal, a construção em terra foi uma prática muito comum até ao final dos anos sessenta [1]. No distrito de Aveiro, o adobe usou-se na construção de edifícios em meios rurais e urbanos, muitos dos quais possuem um reconhecido valor cultural, histórico e arquitectónico. Um número significativo de construções existentes em adobe apresenta acentuados danos estruturais decorrentes, entre outros factores, da falta de manutenção [2]. Portanto, é importante investigar o comportamento estrutural deste tipo de construções, nomeadamente no que respeita à segurança sísmica, e desenvolver soluções eficientes de reforço. Para a caracterização estrutural de estruturas de alvenaria, e particularmente de estruturas de adobe, a identificação dinâmica é utilizada para calibrar modelos numéricos e também para a monitorização da evolução de danos estruturais e outros agentes de deterioração. A complexidade dos sistemas estruturais, normalmente associados a estas construções em alvenaria de adobe, justifica a necessidade do desenvolvimento e optimização de metodologias SHM com base em medições de parâmetros dinâmicos.

Os blocos de adobe usados na construção da parede utilizada, com dimensões de $29 \times 45 \times 12 \text{ cm}^3$ e um peso volúmico médio de 16 kN/m^3 , foram obtidos de uma demolição no lugar de Paço, em Aveiro. A parede foi construída no Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, no âmbito de trabalho de investigação para a dissertação de mestrado em Engenharia Civil do licenciado Henrique Pereira [3] e para a dissertação de doutoramento em Engenharia Civil da licenciada Dora Silveira [4].

A parede foi construída com uma geometria em planta em forma de “I”, com uma altura de 3.07 m, um comprimento de 3.50 m e uma espessura média correspondente à largura média dos blocos de adobe mais o reboco em ambas as faces de aproximadamente 0.33 m. A parede é fixa na sua base a maciços de betão armado, que por sua vez foram fixos através de varões pré-esforçados à laje de reacção do laboratório. A ligação da primeira fiada de adobes aos blocos de betão armado foi realizada com argamassa de cimento, impedindo que durante o ensaio ocorresse a rotura prematura por escorregamento na junta entre os blocos de fundação e a primeira fiada de adobes. No topo da parede foi aplicada uma carga vertical adicional de 20 kN,

de forma a simular as restantes acções permanentes, tais como tectos falsos, estrutura da cobertura e seu revestimento, etc [1].

Por forma a medir a evolução das deformações em vários pontos da parede durante a aplicação da carga horizontal cíclica, foram utilizados treze sensores estáticos de deslocamento relativo, baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica. Destes, nove foram desenvolvidos no Departamento de Física da Universidade de Aveiro (DOT01, ..., DOT09) e os quatro restantes correspondem a soluções comerciais (LDOT01, LDOT02, LDOT03, LDOT04) da *Beijing Pi-Optics Co. Ltd* (modelo FBGD10011). Os sensores ópticos foram instalados na estrutura de adobe de acordo com a distribuição esquematizada nas figuras 5.1 e 5.2, medindo cada um deslocamento relativo entre dois pontos da estrutura na direcção horizontal, vertical ou diagonal. As faces Oeste e Sul da parede foram monitorizadas com recurso a sensores electrónicos, não descritos neste trabalho. Na face Norte foram utilizados os nove sensores ópticos desenvolvidos, sendo identificados por: DOT01, DOT02, DOT03 e DOT04, para os sensores sensíveis a deformações verticais na base da parede; e DOT05, DOT06, DOT07, DOT08 e DOT09 para os sensores utilizados na monitorização de um quadro central da face Norte da parede. Na face Este da estrutura foram utilizados os quatro sensores ópticos comerciais, sendo LDOT01, LDOT02 e LDOT03 utilizados na monitorização da deformação vertical do primeiro metro da base da parede e LDOT04 na monitorização de movimentos horizontais de um ponto da parede a uma altura de 1.47 m segundo a direcção Oeste-Este.

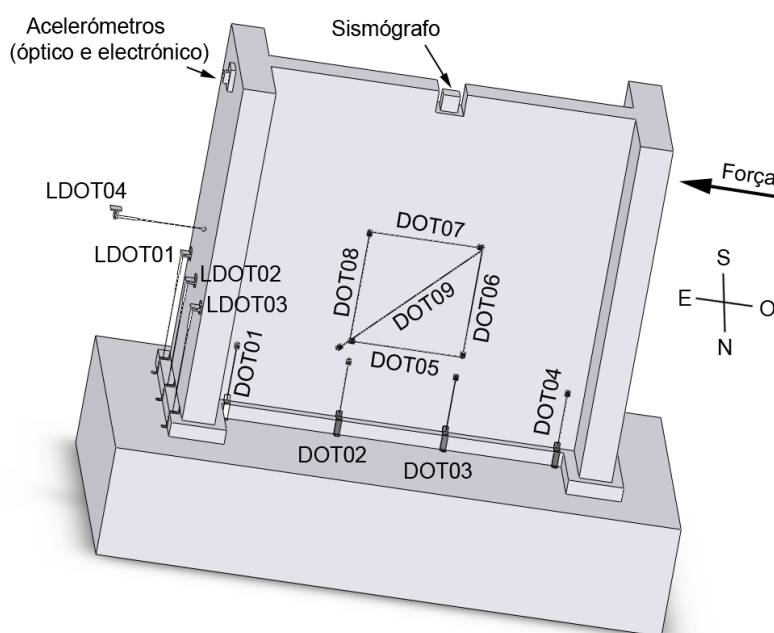


Figura 5.1: Esquema da parede e localização dos sensores ópticos.

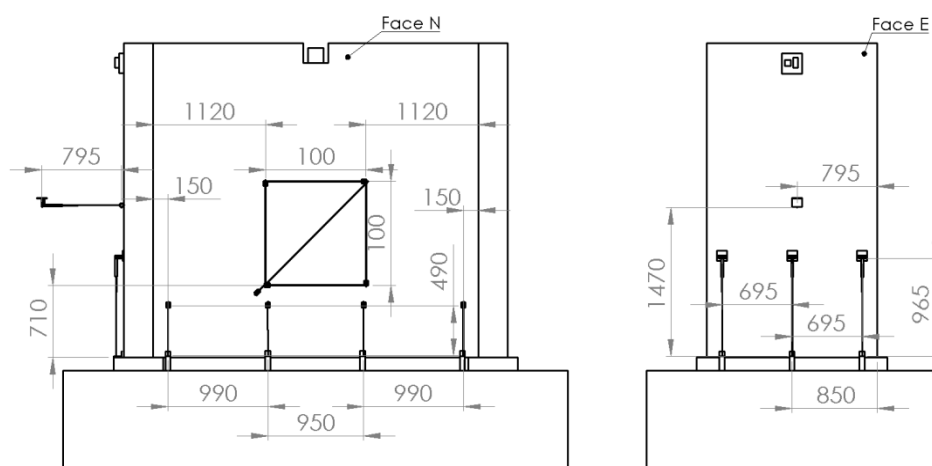


Figura 5.2: Alçados da parede e localização dos sensores ópticos (dimensões em mm).

Inicialmente estava ainda planeada a utilização de sensores para a monitorização de movimentos horizontais na face Oeste e um outro sensor na segunda diagonal do quadro central da face Norte da estrutura, no entanto estes sensores foram danificados durante a montagem, não sendo possível a sua substituição em tempo útil para a realização do ensaio.

Os sensores estáticos implementados consistem numa fibra óptica, com uma rede de Bragg inscrita, colada em dois suportes, um fixo e um móvel. Este último permite a aplicação de uma pré-tensão, possibilitando assim medir não só o afastamento, mas também a aproximação dos pontos monitorizados da estrutura. Na figura 5.3 apresenta-se, a título de exemplo, um dos sensores utilizados. Neste exemplo o suporte fixo encontra-se ligado ao maciço de betão na base da parede e não à parede em si; deste modo medem-se deformações entre o ponto de apoio do suporte móvel e a base rígida da parede.



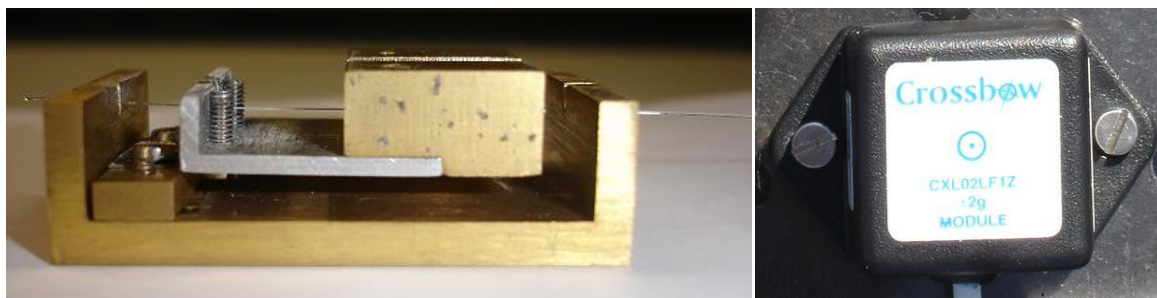
Figura 5.3: Exemplo de um sensor desenvolvido e utilizado na monitorização da parede durante o ensaio estático.

A rede de sensores foi multiplexada através de três fibras ópticas. Uma das fibras continha os sensores LDOT01, LDOT02, LDOT03 e LDOT04 dedicados à medição de deslocamentos relativos na face Este da parede; uma segunda fibra óptica recolheu o sinal dos sensores do quadro central da face Norte da parede (DOT05, DOT06, DOT07, DOT08 e DOT09); e uma terceira fibra óptica possibilitou obter o sinal dos sensores da base da face norte (DOT01, DOT02, DOT03 e DOT04). As três fibras ópticas foram multiplexadas usando um acoplador 1×3 e o sinal foi adquirido com uma taxa de 1 amostra por segundo. As FBGs produzidas e utilizadas neste ensaio foram gravadas em fibra monomodo fotossensível (*FiberCore* PS1250/1500) com um laser de excímeros KrF a 248 nm, utilizando a técnica de máscara de fase. As FBGs têm um comprimento de 3 mm e uma rejeição óptica média de 25 dB. Cada uma das FBGs foi escrita com um comprimento de onda de Bragg diferente, nomeadamente: 1531, 1535, 1538, 1543, 1546, 1552, 1559, 1561 e 1564 nm.

Antes da sua utilização, todas as redes de Bragg foram caracterizadas por forma a obter a sensibilidade à deformação e à temperatura. Para a caracterização a variações de temperatura, a fibra com a rede de Bragg foi colocada sobre um módulo termoeléctrico e coberto com um composto com elevada condutividade térmica para facilitar o progresso de transferência de calor entre o módulo termoeléctrico e a FBG. O módulo termoeléctrico foi comandado por um controlador modelo TED 350 da *ThorLabs*, utilizando como sensor de temperatura um circuito integrado LM335. No caso da caracterização à deformação, a fibra com a FBG foi fixa a um suporte em uma extremidade e a um dispositivo de translação linear na outra extremidade, o que permitiu aplicar uma tensão controlável. Em ambos os tipos de caracterização, o comprimento de onda de Bragg foi monitorizado por uma unidade interrogadora SM125 da *Micron Optics*. Foi obtido um valor médio de $1.18 \pm 0.02 \text{ pm} / \mu\epsilon$ para a sensibilidade à deformação. Este valor será posteriormente usado para converter o valor do comprimento de onda de Bragg em deslocamento relativo dos pontos da parede em cada posição de monitorização. A sensibilidade dos sensores à temperatura foi obtida através do ajuste linear aos dados de comprimento de onda em função da temperatura, conduzindo a um valor médio de $8.72 \pm 0.06 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. No entanto, os testes descritos na parede tiveram uma duração inferior a 1 hora, ocorrendo num intervalo temporal onde não se espera uma variação da temperatura ambiente significativa, assim negligenciou-se o efeito da temperatura nos sensores.

O sensor óptico de aceleração, identificado na secção 4.2 como modelo V1, foi utilizado em medidas dinâmicas na parede de adobe com o objectivo de estimar a sua frequência própria, em simultâneo com um acelerómetro electrónico da *Crossbow Technology, inc.*, modelo CLX02LF1Z

(LF series) e um sismógrafo da *GeoSig*, modelo AC-63. Os ensaios dinâmicos não-destrutivos permitem identificar as frequências próprias das estruturas, caracterizar o seu comportamento dinâmico e calibrar modelos numéricos usados para descrever a estrutura. A localização dos sensores dinâmicos usados, que se mostram na figura 5.4, está indicada na figura 5.1.



a)

b)

Figura 5.4: Acelerómetros utilizados:
a) acelerómetro óptico e b) acelerómetro electrónico.

Os acelerómetros, óptico e electrónico, apresentados na figura 5.4, foram colocados na face Este da parede, a 20 cm do topo desta, com o eixo sensível alinhado na direcção Oeste-Este, tal como ilustrado nas figuras 5.1 e 5.2. Por sua vez, o sismógrafo ficou localizado também no topo da parede mas numa zona central, sendo sensível à aceleração nas três direcções ortogonais.

As forças horizontais foram impostas por um actuador hidráulico fixo na face Oeste da parede, segundo a direcção Oeste-Este. O actuador hidráulico, que se visualiza na figura 5.5, foi colocado a uma altura de 2.5 m relativamente à base da parede e foi fixo numa parede de reacção situada a Oeste da parede de adobe estudada.

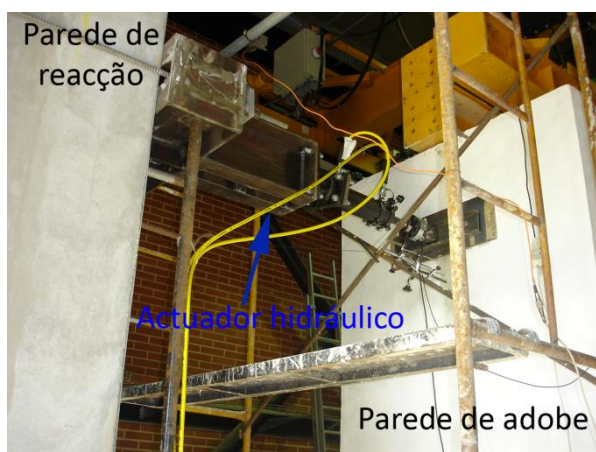


Figura 5.5: Actuador hidráulico utilizado para impor a força longitudinal cíclica no ensaio da parede de adobe.

A força cíclica aplicada horizontalmente pelo actuador foi medida com recurso a uma célula de carga do tipo TC4, da marca *AEP-Transducers*, em simultâneo com o registo de deslocamentos relativos em vários pontos através de transdutores electrónicos que não são descritos no âmbito deste trabalho. A evolução da força aplicada durante o ensaio é apresentada na figura 5.6, na qual é também indicada a localização temporal dos ensaios dinâmicos efectuados.

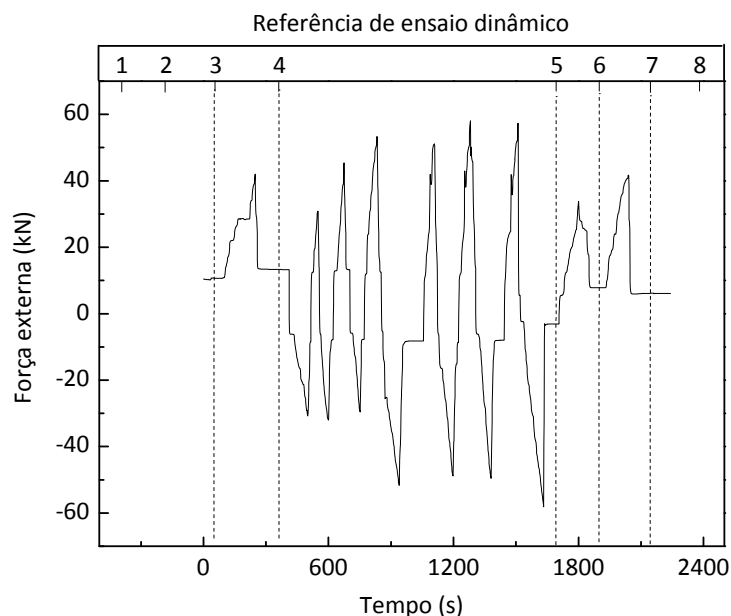


Figura 5.6: Evolução no tempo da força horizontal aplicada e indicação da localização temporal dos ensaios dinâmicos efectuados (1 a 8).

5.3 RESULTADOS

Durante o ensaio foi registada a evolução da deformação estática em cada ponto monitorizado, associada à força horizontal cíclica aplicada. A realização de medições dinâmicas em diferentes estados de degradação da parede ao longo do ensaio destrutivo permitiu obter a evolução da primeira frequência própria longitudinal com o decaimento da sua rigidez.

5.3.1 ENSAIO ESTÁTICO

O sensor LDOT04 mediu o deslocamento horizontal na direcção de acção do actuador hidráulico. A evolução do deslocamento registado com este sensor e da força aplicada ao longo do tempo encontram-se representados na figura 5.7, permitindo identificar os dois instantes em que foram produzidas as duas fissuras principais na parede. A primeira ocorre no instante 1847 s de ensaio e a segunda no instante 2032 s.

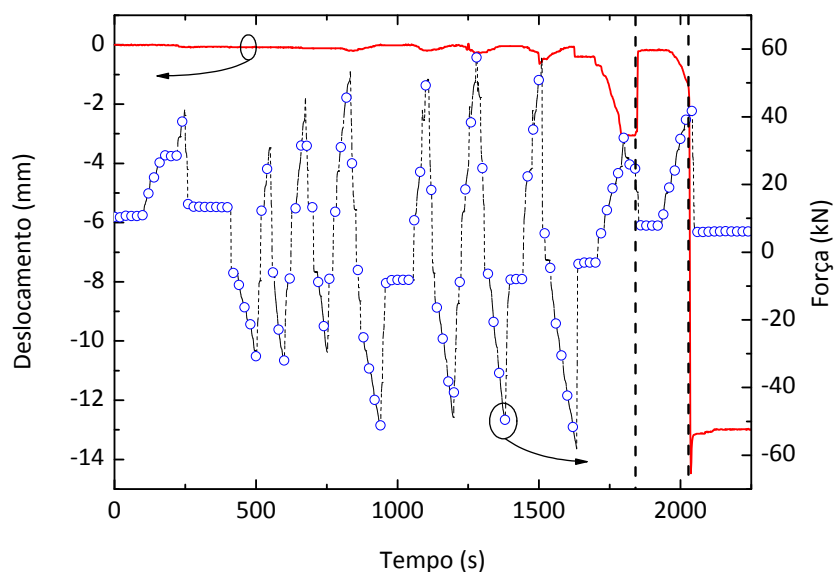


Figura 5.7: Evolução do deslocamento relativo registado no sensor LDOT04 e da força aplicada ao longo do tempo. As linhas verticais a tracejado identificam os dois instantes em que foram produzidas as duas fissuras principais na parede.

Na figura 5.8 apresentam-se as evoluções de deslocamento relativo registados com os sensores colocados na face Este da parede. As linhas a tracejado na figura representam os instantes onde ocorreram as duas principais fissuras (1847 s e 2032 s), que são perfeitamente identificadas pelos dados recolhidos em cada um destes sensores.

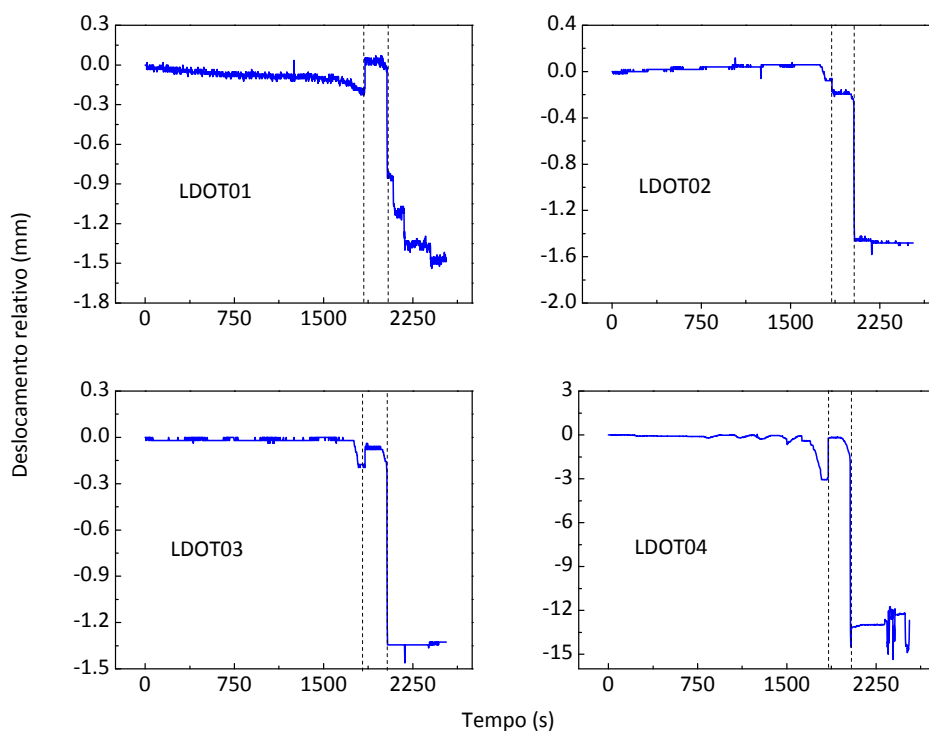


Figura 5.8: Deslocamentos relativos registados pelos sensores da face E da parede ao longo do ensaio.

Na figura 5.9 encontram-se representados os valores de amplitude máximos (positivos e negativos) registados nos sensores de deslocamento vertical da face Este da parede, verificando-se que os maiores deslocamentos ocorrem na parte central, correspondente ao banzo da parede. Tendo em conta a geometria da parede, em "I", e o tipo de carregamento (no plano da alma da parede), este resultado vai de encontro ao que seria de esperar pela instalação de maiores tensões no alinhamento correspondente à alma.

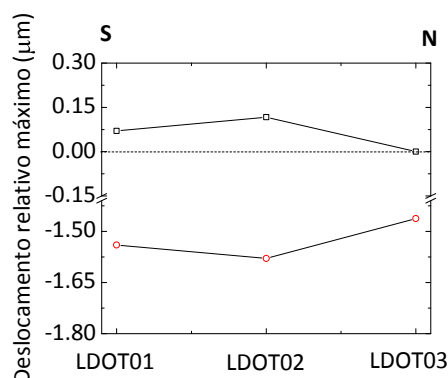


Figura 5.9: Valores máximos (positivos e negativos) de deslocamento relativo medidos nos sensores verticais da face Este da parede.

O funcionamento dos sensores ópticos colocados na base da parede (face Norte) é ilustrado pelos dados da figura 5.10, onde se observa que o deslocamento relativo vertical da parede, medido com o sensor DOT04, acompanha a evolução da força cíclica aplicada. Após 1650 s de ensaio, os deslocamentos registados neste sensor deixam de acompanhar a evolução da força aplicada, pois desenvolve-se nesse momento uma fissura na zona de leitura do sensor (figura 5.10 b).

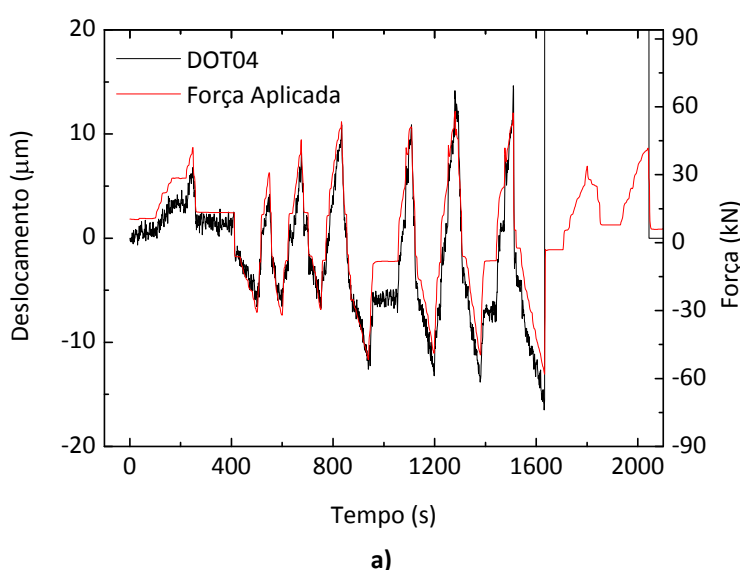


Figura 5.10: a) Evolução do deslocamento no sensor DOT04 e da força horizontal aplicada, antes da formação da primeira fissura; b) fissura formada na região de acção do sensor.

Na figura 5.11 apresentam-se as evoluções da deformação medida nos quatro sensores verticais colocados na base da face Norte da parede (DOT01, DOT02, DOT03 e DOT04).

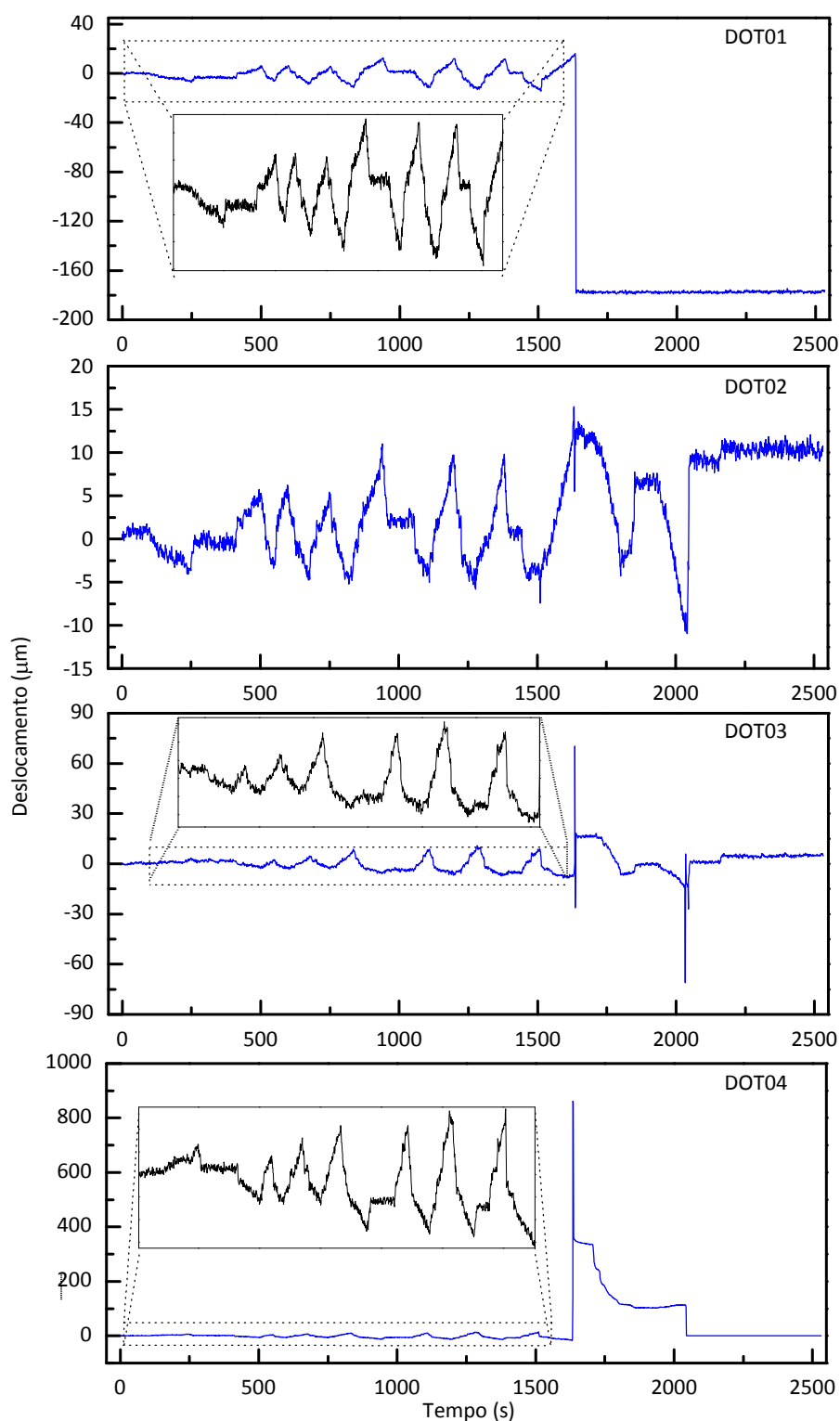


Figura 5.11: Evolução da deformação medida nos sensores de deslocamento vertical na base da face Norte da parede.

Na figura 5.12 estão representados os valores de amplitude máximos (positivos e negativos) registados com os sensores de deslocamento vertical da base da parede na face Norte, ao longo de todo o ensaio. De acordo com os resultados apresentados na figura 5.12, verifica-se que o ponto onde ocorrem os maiores deslocamentos verticais se encontra mais próximo da face da parede em que é aplicada a carga horizontal, correspondendo à abertura de uma fissura observada na base para uma força no sentido de Oeste para Este. A deformação máxima registada no ponto oposto (DOT01) corresponde a deformações por contracção.

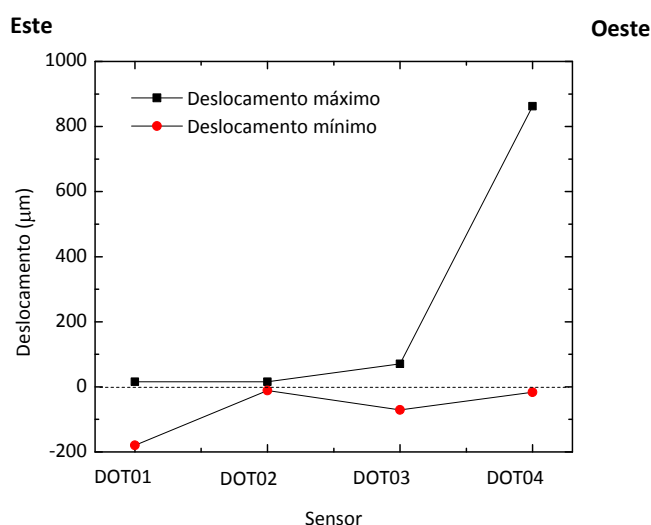


Figura 5.12: Valores de amplitude máximos (positivos e negativos) do deslocamento relativo vertical na base da parede (face Norte).

Para analisar a rigidez da parede, na figura 5.13 mostra-se a força externa aplicada em função da deformação medida com os sensores DOT01 e DOT04.

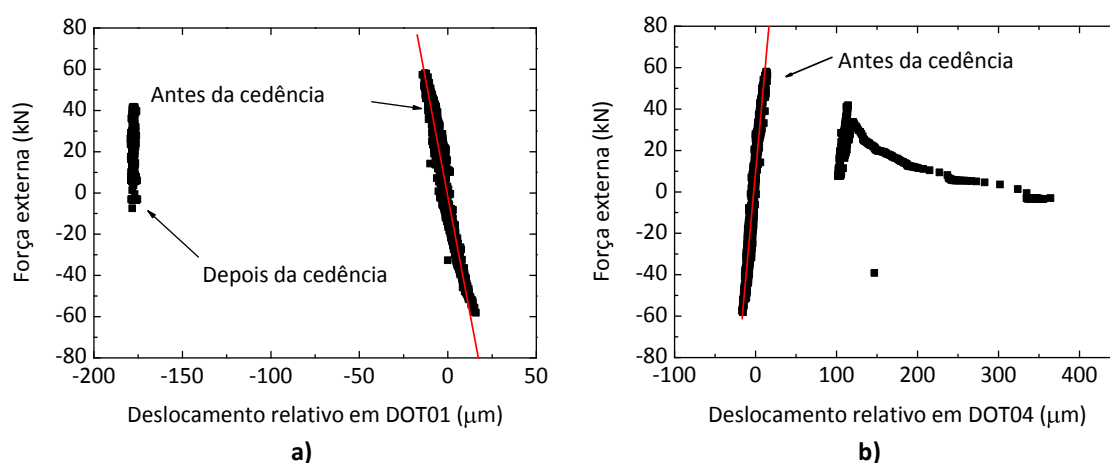


Figura 5.13: Força externa aplicada em função do deslocamento relativo, para os dois sensores extremos colocados na base da face Norte da parede: a) DOT01 e b) DOT04.

Os pontos correspondem a dados experimentais e as linhas são ajustes lineares ($R^2 = 0.999$).

Inicialmente, antes da fissuração, é observado um regime linear da resposta, correspondente a uma deformação proporcional à força externa aplicada. Neste regime inicial elástico é possível quantificar a relação entre a força externa horizontal e a deformação em cada ponto monitorizado, através de um ajuste linear dos dados.

Quando a força externa é aplicada no sentido de Oeste para Este, observam-se deformações verticais positivas (de extensão) na base da parede no lado Oeste e uma contracção no lado oposto. A relação entre a força aplicada e o deslocamento relativo medido na base da parede é proporcional à distância ao ponto de aplicação da força. Este resultado é observado na figura 5.14, demonstrando uma relação linear com um declive de $0.168 \pm 0.033 \mu\text{m.kN}^{-1}.\text{m}^{-1}$ e uma ordenada na origem de $0.009 \pm 0.036 \mu\text{m.kN}^{-1}$. Na verdade, esse comportamento representa a componente de deformação por flexão da parede na sua base.

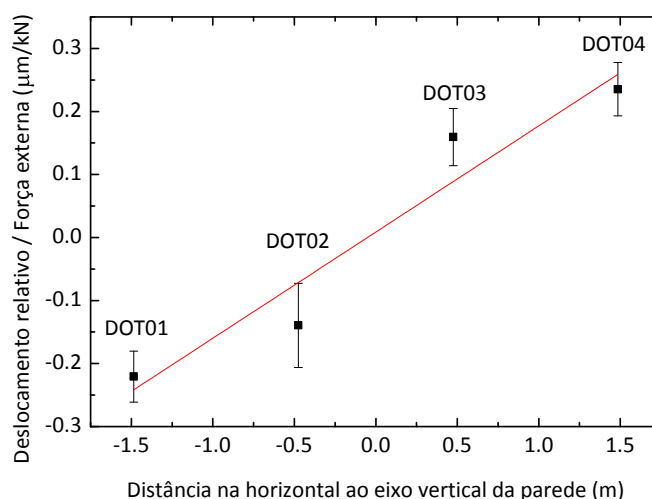


Figura 5.14. Relação entre o deslocamento relativo e a força externa aplicada, em função da distância horizontal dos pontos monitorizados ao eixo vertical da parede. Os pontos são dados experimentais e a linha o ajuste linear ($R^2 = 0.920$).

A rede de sensores colocada no quadro central da face Norte da parede permitiu identificar claramente os danos principais da estrutura em adobe. A figura 5.15 mostra a localização dos sensores e das fissuras principais. Na mesma figura são ainda identificados os pontos de apoio dos sensores, designados de 1 a 4.

Na figura 5.16 apresenta-se a evolução dos dados recolhidos com os sensores colocados no quadro central da face Norte da parede.

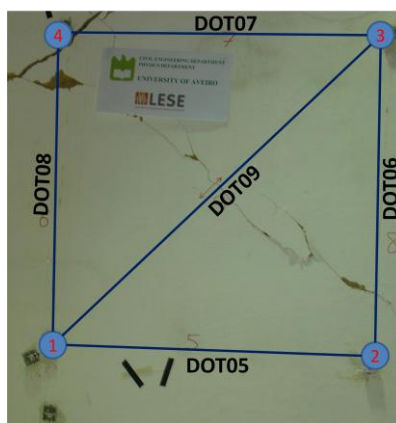


Figura 5.15: Estado final de dano na região dos sensores do quadro central da parede na face Norte.

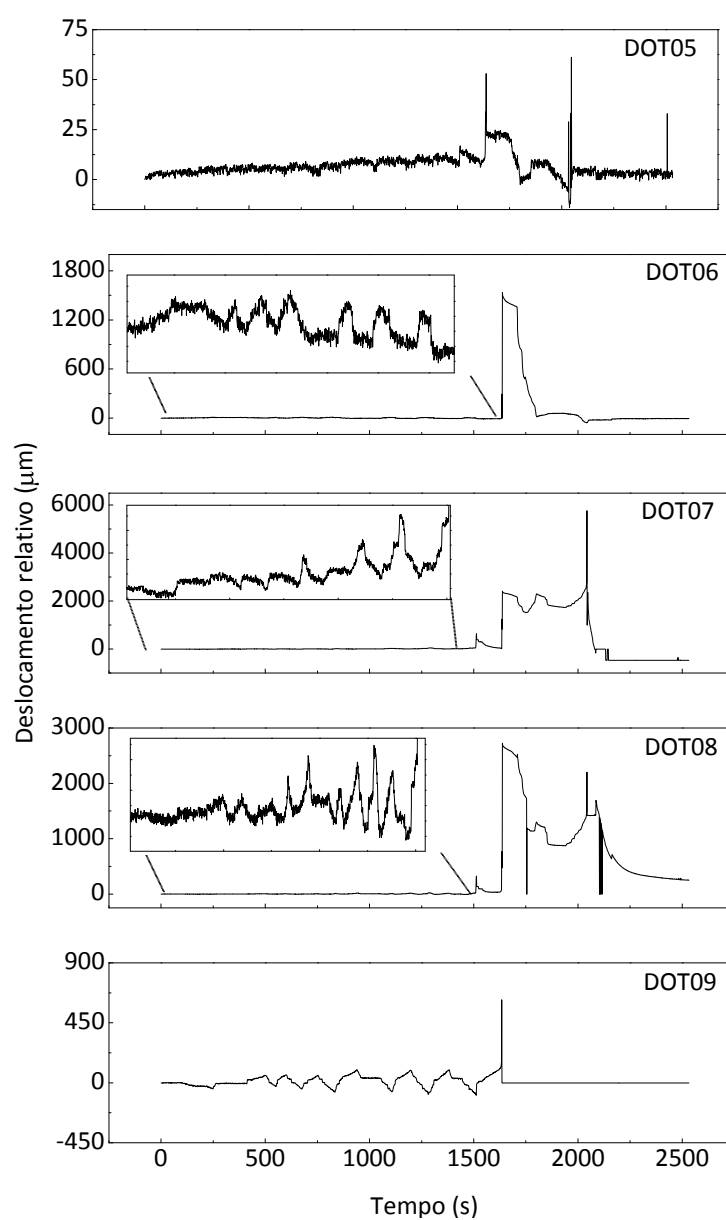
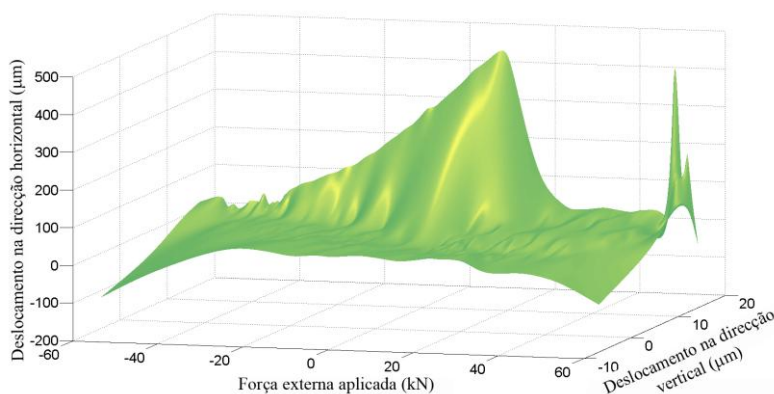
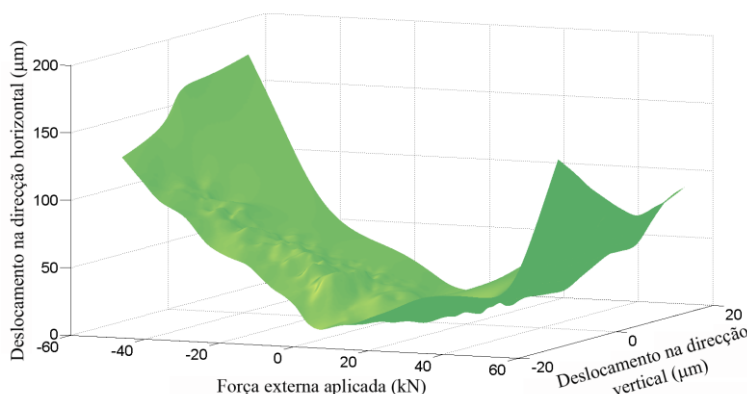


Figura 5.16: Deslocamentos relativos registados pelos sensores do quadro central da face Norte.

A análise dos dados da figura 5.16 e a observação do estado final de dano da parede nessa região, ilustrado na figura 5.15, permitiu demonstrar a adequabilidade dos sensores ópticos implementados à aplicação pretendida. As maiores variações de deslocamento são registadas para os sensores em posições interceptadas pelas fissuras de maior expressão. Como é perceptível no estado final de dano na zona central da parede indicada na figura 5.15, verifica-se que o único sensor do quadro central que não abrange alguma fissura é o sensor DOT05. Este facto é confirmado analisando os dados da figura 5.16, onde se verifica que as menores deformações são registadas nesse sensor. A partir dos dados registados com a rede de sensores instalada no quadro central da alma da parede, foi possível identificar e interpretar o movimento relativo dos pontos monitorizados. Para esta análise, as duas componentes de deslocamento do ponto 1 foram consideradas nulas, assumindo-se assim como ponto de referência. O movimento na direcção vertical e horizontal dos pontos 3 e 4, relativamente ao ponto 1, em função da força externa aplicada encontra-se representado, respectivamente, na figura 5.17 a) e b).



a)



b)

Figura 5.17: Evolução do deslocamento relativo registado durante o ensaio cíclico (os dados foram interpolados entre as medidas experimentais para serem apresentados como uma superfície):

a) ponto 3 e b) ponto 4.

O maior movimento relativo ocorre na direcção horizontal, no entanto, com a evolução do dano na parede ao longo do ensaio, são também observados movimentos relativos verticais relevantes para os pontos 3 e 4. Para o ponto 3, no final do teste e após a fissuração da parede, é também observado um pico para o deslocamento na direcção horizontal. Estas informações e conclusões são consistentes com o padrão de dano local observado na parede, representado na figura 5.15.

A figura 5.18 mostra o estado final de dano da parede (lado Sul) após a conclusão do ensaio.



Figura 5.18: Estado final de dano da parede ensaiada (face Sul).

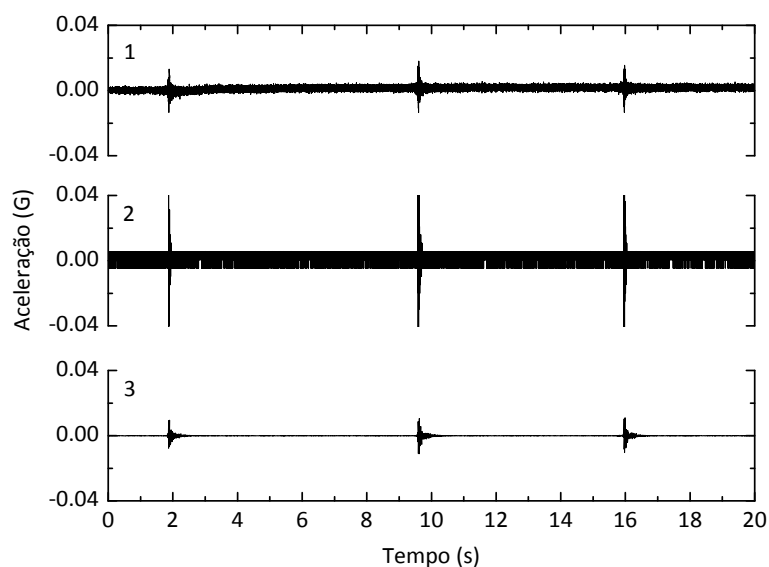
5.3.2 ENSAIOS DINÂMICOS

Com os três sensores dinâmicos mencionados na secção 5.2 foram realizadas, em vários momentos do ensaio da parede, leituras da aceleração ao longo do tempo, aplicando-se três impulsos dinâmicos sobre a parede na direcção Oeste-Este, como forma de excitação. Este procedimento foi repetido para vários níveis de dano, antes, durante e após o ensaio estático destrutivo, de acordo com a sequência apresentada na tabela 5.1. A localização temporal dos ensaios dinâmicos 3, 4, 5, 6 e 7 pode ser observada na figura 5.6. Na tabela 5.1 apresenta-se ainda o *Drift* máximo (deslocamento longitudinal máximo a dividir pela altura do ponto de medição) após o 1º e 3º ciclo de carga e após o aparecimento das principais fissuras diagonais. O deslocamento máximo de referência foi medido recorrendo aos dados do sensor LDOT04, apresentados na secção anterior.

Referência do ensaio dinâmico	Condições do ensaio dinâmico	Drift máximo (%)
1	Sem carga vertical adicional	-
2	Com carga vertical adicional	-
3	Após ligar o actuador	-
4	Após 1º ciclo de carga	0.003
5	Após 3º ciclo de carga	0.043
6	Após 1ª fissura diagonal	0.208
7	Após 2ª fissura diagonal	0.984
8	No final do ensaio, sem carga vertical adicional	-

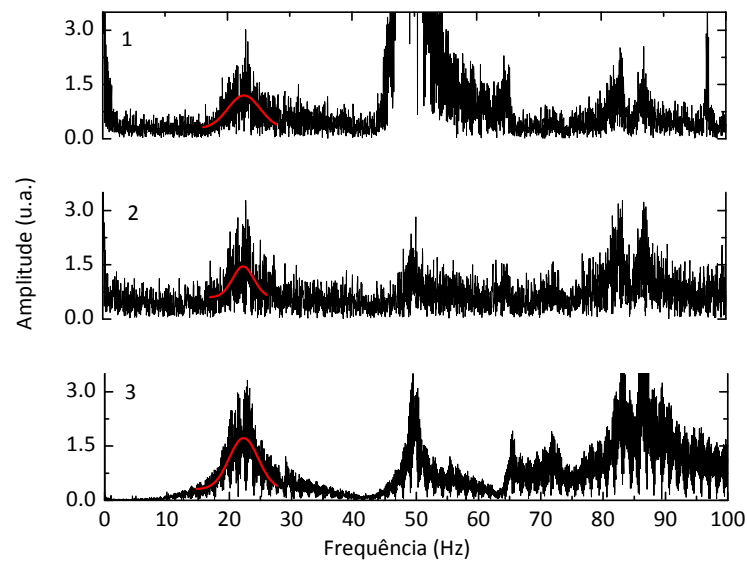
Tabela 5.1: Descrição dos ensaios dinâmicos realizados.

A aplicação da transformada de Fourier aos dados de aceleração ao longo do tempo permite obter o valor das frequências próprias da estrutura. A título de exemplo, nas figuras 5.19 e 5.21 mostram-se os dados referentes aos ensaios dinâmicos número 2 e 7. O valor da primeira frequência própria da parede é encontrado através de um ajuste gaussiano ao primeiro pico do espectro de frequência, podendo este ser observado também nas figuras 5.20 e 5.22 para os dois ensaios referidos.



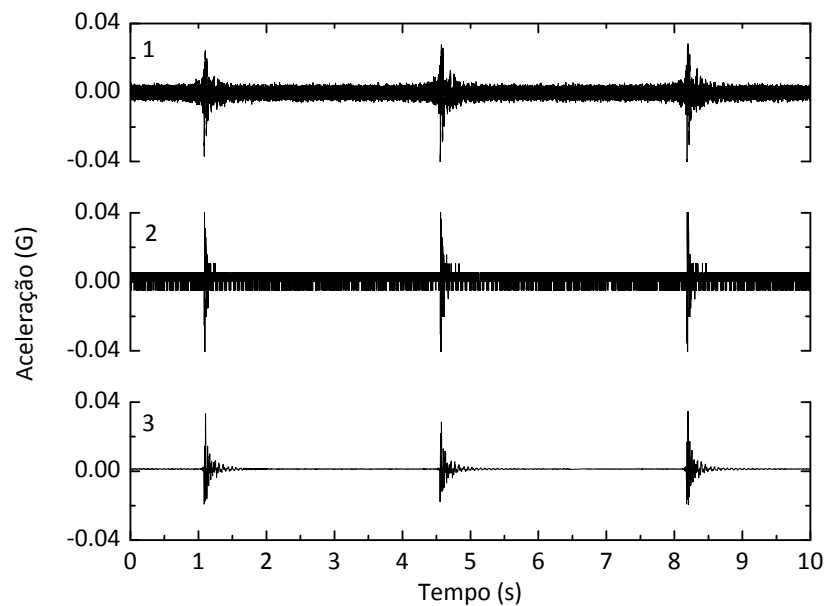
(1: Acelerómetro óptico, 2: Acelerómetro electrónico, 3: Sismógrafo)

Figura 5.19: Dados de aceleração registados ao longo do tempo no ensaio dinâmico 2, com carga vertical adicional e antes do ensaio cíclico.



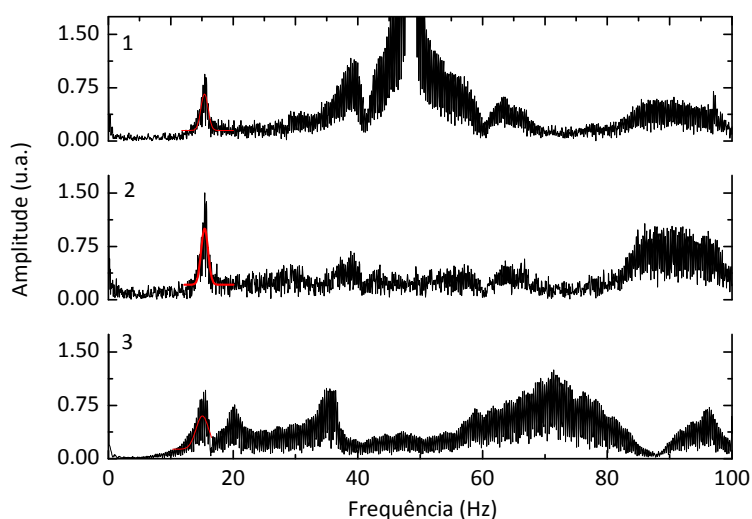
(1: Acelerómetro óptico, 2: Acelerómetro electrónico, 3: Sismógrafo)

Figura 5.20: Espectro de frequências obtido por transformada de Fourier dos dados de aceleração ao longo do tempo no ensaio dinâmico 2.



(1: Acelerómetro óptico, 2: Acelerómetro electrónico, 3: Sismógrafo)

Figura 5.21: Dados de aceleração registados ao longo do tempo no ensaio dinâmico 7, após a formação da 2ª fissura diagonal.



(1: Acelerómetro óptico, 2: Acelerómetro electrónico, 3: Sismógrafo)

Figura 5.22: Espectro de frequências obtido por transformada de Fourier dos dados de aceleração ao longo do tempo no ensaio dinâmico 7.

Da análise dos espectros de frequência apresentados nas figuras 5.20 e 5.22 observa-se uma componente espectral de maior intensidade para frequências em torno de 50 Hz, no caso das medidas obtidas com o sensor óptico usado (modelo V1). Este facto deve-se à proximidade com o valor da frequência própria do acelerómetro óptico, que se encontra em torno dos 50 Hz. A evolução da primeira frequência própria da parede, medida nos diferentes ensaios dinâmicos de acordo com o referido anteriormente (ver tabela 5.1), apresenta-se registada na figura 5.23 e na tabela 5.2.

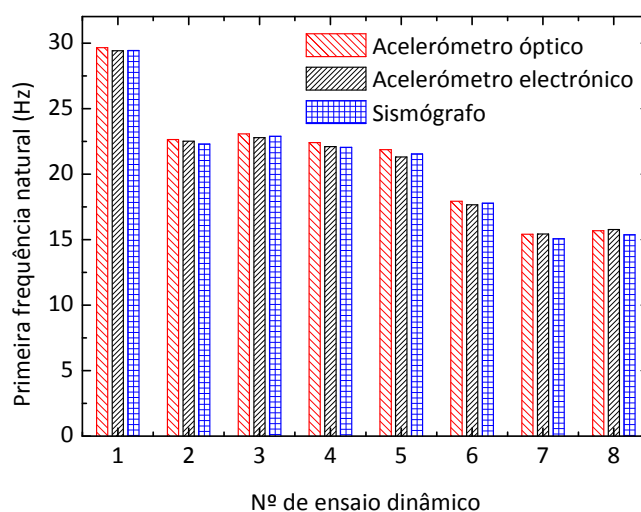


Figura 5.23: Evolução da primeira frequência própria da parede de adobe ao longo do ensaio destrutivo, medida com os três sensores.

Referência do ensaio dinâmico	Condições do ensaio dinâmico	Frequência (Hz)			Erro relativo (%)
		Óptico	Electrónico	Sismógrafo	
1	Sem carga vertical adicional	29.67	29.43	29.45	0.78
2	Com carga vertical adicional	22.65	22.52	22.30	1.07
3	Após ligar o actuador	23.08	22.79	22.89	1.05
4	Após 1º ciclo de carga	22.41	22.11	22.06	1.48
5	Após 3º ciclo de carga	21.88	21.32	21.55	2.08
6	Após 1ª fissura diagonal	17.94	17.67	17.79	1.20
7	Após 2ª fissura diagonal	15.41	15.43	15.07	1.20
8	No final do ensaio, sem carga vertical adicional	15.69	15.77	15.38	1.25

Tabela 5.2: Primeira frequência própria da parede nas várias fases do ensaio, determinada a partir das medidas com os três sensores dinâmicos e erro relativo na frequência própria obtida com o sensor óptico, relativamente ao valor médio obtido com o sensor electrónico e com o sismógrafo.

Verifica-se uma diminuição do valor da frequência própria da estrutura com a degradação decorrente do ensaio destrutivo. Este resultado vai de encontro ao esperado, já que a perda de rigidez implica a diminuição do valor da frequência própria. Verifica-se ainda um pequeno aumento do valor da primeira frequência própria da parede no teste logo após se ligar o actuador à estrutura, associado às restrições de movimento da estrutura quando este está ligado. Dos dados da figura 5.23 e tabela 5.2, verifica-se o bom desempenho do sensor óptico implementado. A primeira frequência própria da estrutura foi determinada com sucesso recorrendo ao sensor óptico com um erro relativo máximo de 2.08 %, tendo em conta o valor médio de frequências obtidas com o sensor electrónico e com o sismógrafo.

5.4 FREQUÊNCIA PRÓPRIA DA PAREDE APÓS REPARAÇÃO E REFORÇO

Após o ensaio destrutivo com aplicação de carga cíclica longitudinal, a parede foi reparada e reforçada tendo em vista estudar uma solução de melhoria do seu desempenho para acções sísmicas. A reparação da parede foi realizada procedendo à injeção de uma argamassa de selagem de fissuras. Como estratégia de reforço foi aplicada uma rede sintética tipo *Cintaflex*, embebida no reboco. As faixas de rede aplicadas possuíam uma sobreposição lateral de cerca de 20 cm [5].

A parede reforçada foi sujeita a uma carga horizontal, aplicada com recurso ao actuador hidráulico já utilizado no ensaio de caracterização do comportamento, colocado a uma altura de 2.5 m, a Oeste da estrutura. O ensaio da parede reparada foi realizado com controlo de deslocamentos e monitorizado com vários sensores electrónicos, entre os quais um sismógrafo, de modo a determinar a evolução da sua frequência própria após o reforço. A evolução da primeira frequência própria da parede reforçada durante o ensaio destrutivo apresenta-se na tabela 5.3 e figura 5.24.

A comparação dos dados da tabela 5.3 com os dados da tabela 5.2 permite concluir que a reparação e reforço sísmico da estrutura conduziram a um aumento de 11.48 % no valor da sua primeira frequência própria, indicando um ligeiro aumento de rigidez com o reforço.

Referência do ensaio dinâmico	Condições do ensaio dinâmico	Frequência (Hz) Sismógrafo	<i>Drift</i> máximo (%)
1	Sem carga vertical adicional	33.0	-
2	Com carga vertical adicional	23.0	-
3	Após ligar o actuador	24.0	-
4	Após primeiro ciclo 0.25 mm	23.0	0.01
5	Após 1º ciclo 0.5 mm	23.5	0.02
6	Após 1º ciclo 1.25 mm	23.5	0.05
7	Após 1º ciclo 2.5 mm	23.5	0.10
8	Após 1º ciclo 5.0 mm	22.5	0.20
9	Após 1º ciclo 12.5 mm	20.0	0.50
10	Após 1º ciclo 25 mm	17.5	1.00
11	Após 1º ciclo 37.5 mm	15.0	-
12	No final do ensaio, sem carga vertical adicional	28.1	-

Tabela 5.3: Ensaio dinâmico efectuado na parede reforçada.

A análise dos dados da tabela 5.3 e figura 5.24 permite verificar que o valor da frequência própria decresce com o aumento do *Drift* lateral imposto. No entanto, a rigidez da estrutura mantém-se praticamente constante até se atingir um *Drift* de 0.1 %. Após este valor de *Drift*, verifica-se um decréscimo gradual do valor da frequência própria, indicando uma degradação progressiva da rigidez da estrutura. O valor da primeira frequência própria determinada no ensaio dinâmico 11

decreceu 34.78 %, relativamente ao valor inicial com carga vertical, dando indicação de uma degradação considerável.

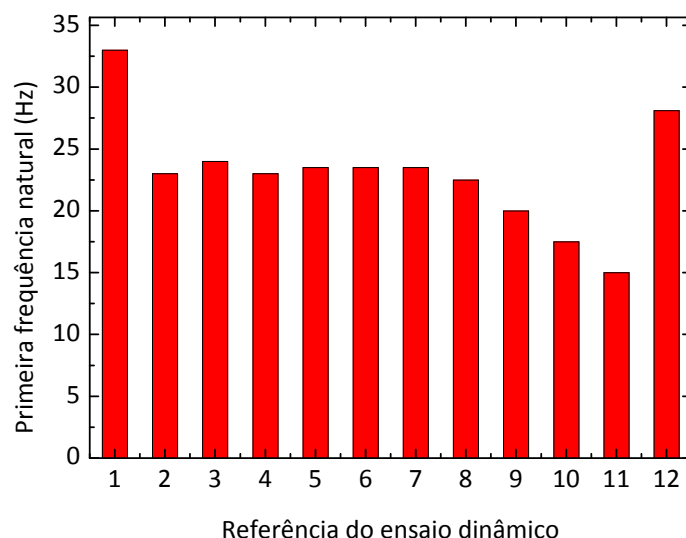


Figura 5.24: Evolução da primeira frequência própria da parede de adobe, reparada e reforçada, ao longo do ensaio cíclico destrutivo, determinada a partir das medidas com o sismógrafo.

5.5 CONCLUSÕES

O estudo permitiu verificar a aplicabilidade de sensores ópticos na monitorização estática e dinâmica de estruturas.

Uma rede de treze sensores de deslocamento relativo foi implementada com sucesso e interrogada, o que permitiu monitorizar um ensaio destrutivo realizado numa parede de adobe construída à escala real. O sensor óptico dinâmico permitiu obter a primeira frequência própria da parede com um erro relativo máximo de 2.08 %. Observa-se uma diminuição da primeira frequência própria da estrutura, com a propagação de danos durante o ensaio destrutivo. Esse resultado era esperado, uma vez que a perda de rigidez associada aos danos implica uma diminuição na frequência própria em qualquer tipo de estrutura. Quanto ao comportamento da parede em análise, observa-se uma diminuição de 31.96 % no valor da primeira frequência própria, entre a situação inicial (sem danos) e no final do ensaio cíclico (estrutura danificada). Além disso, entre os ensaios dinâmicos 5 e 6 da parede original, não reforçada, quando surgem as fissuras principais na parede, estas são registadas pelas medidas estáticas e é observado um decréscimo mais significativo do valor da primeira frequência própria.

Os resultados apresentados mostraram que redes de sensores ópticos podem ser usadas como ferramentas para SHM de sistemas estruturais complexos.

5.6 REFERÊNCIAS

- [1] Humberto Varum, Aníbal Costa, Henrique Pereira, João Almeida and Hugo Rodrigues, “Caracterização do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe”, *Revista da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões*, vol. 15, pp. 23-32, 2008.
- [2] T. Martins and H. Varum, "Adobe's mechanical characterization in ancient constructions: The Case of Aveiro's Region", *Materials Science Forum*, vol. 514-516, pp. 1571-1575, 2006.
- [3] Henrique C. Pereira, “Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.
- [4] Dora Silveira, “Avaliação da vulnerabilidade sísmica e reabilitação de construções existentes em adobe”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2011.
- [5] António J. P. Figueiredo, “Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.
- [6] Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum and Paulo André, “Static and dynamic structural monitoring based on optical fiber sensors”, *12th International Conference on Transparent Optical Networks*, 27 de Junho a 1 de Julho, Munich, Germany, 2010.
- [7] Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum and Paulo André, “Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Adobe wall case study”, *Measurement*, 2011 (Submetido).

Capítulo 6

Monitorização do comportamento dinâmico de uma ponte pedonal

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos dois ensaios dinâmicos, não-destrutivos, de uma ponte pedonal localizada no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. A monitorização foi efectuada com recurso a sensores ópticos de aceleração, baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica.

No decorrer dos ensaios foram realizadas medidas dinâmicas de aceleração, durante a aplicação de impulsos mecânicos no tabuleiro da ponte, num ponto próximo do ponto de medida. Os ensaios permitiram estudar o comportamento da estrutura e, simultaneamente, demonstrar a fiabilidade da utilização de sensores ópticos na caracterização e monitorização estrutural.

Na determinação de frequências próprias verticais os resultados obtidos com recurso ao acelerómetro óptico são comparados com resultados de medidas efectuadas em simultâneo com um acelerómetro electrónico. No caso de frequências próprias longitudinais e transversais, os

resultados obtidos com o sensor óptico são comparados com resultados adquiridos com um sismógrafo, de modo a validar o funcionamento dos sensores implementados.

6.2 DESCRIÇÃO DA PONTE PEDONAL ESTUDADA

A estrutura estudada neste capítulo é uma ponte pedonal situada no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. Esta estrutura, que é apresentada na figura 6.1, faz a ligação entre a zona central do Campus Universitário de Santiago e o Campus do Crasto, sobre o Esteiro de São Pedro.



Figura 6.1: Fotografias da ponte pedonal sobre o Esteiro de São Pedro.

A parte superior do tabuleiro da ponte é formada por uma treliça metálica, com secções “H”, com altura constante de 4 m. A laje do tabuleiro é em betão armado, com 15 cm de espessura e apresenta uma largura de 3 m, sendo apoiado em duas vigas longitudinais, com secção em “I”, que fazem parte da estrutura principal. Os oito pilares de suporte encontram-se afastados entre si de 36 m, sendo o comprimento total da estrutura de 324 m.

Não existindo qualquer junta intermédia, a flexibilidade dos pilares na direcção longitudinal da ponte permite a deformabilidade do tabuleiro em todo o seu comprimento. A ponte está fixa no encontro Norte e é simplesmente apoiada no encontro Sul, permitindo movimentos longitudinais por variações de temperatura. A estabilidade transversal da ponte é assegurada pelos pilares duplos em perfil tubular quadrado ligados entre si por diagonais em forma de “K”. Nos extremos a ponte assenta sobre fundações directas (sapatas), enquanto no caso dos pilares intermédios estes encontram-se apoiados em estacas, dado que a profundidade do terreno com capacidade de carga adequada se encontra entre os 5 e 19 m.

O registo de acelerações foi realizado numa secção a meio do comprimento total da ponte pedonal, entre 2 pilares da ponte, como se mostra na figura 6.2.

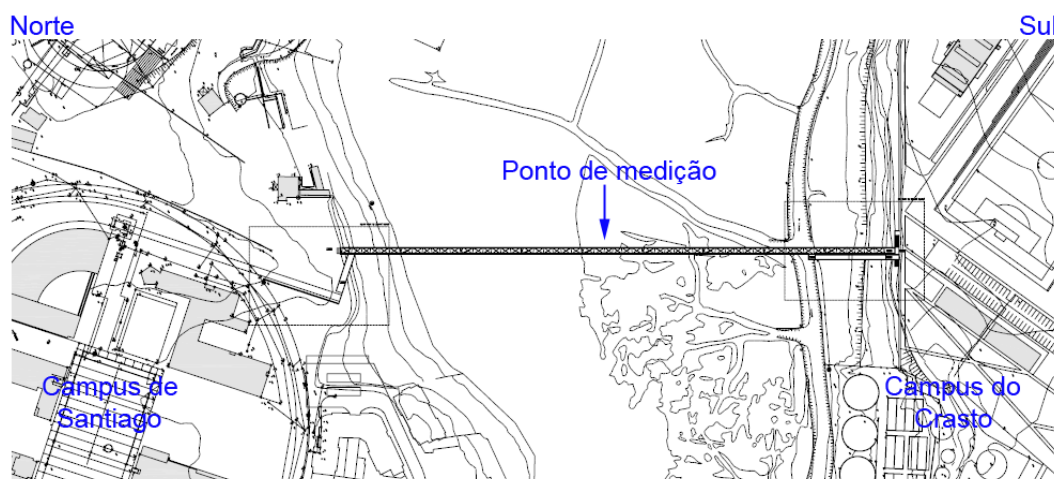


Figura 6.2: Localização do ponto de medição das acelerações na ponte pedonal (planta).

6.3 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS VERTICAIS

Para a obtenção das frequências verticais da ponte pedonal foi utilizado o acelerómetro óptico uniaxial baseado em redes de Bragg, designado por modelo V1, com um sistema de interrogação comercial da *Fibersensing*, modelo FS4200 e com uma taxa de amostragem de 200 Hz. Como referência para comparação foi utilizado um acelerómetro electrónico uniaxial da *Crossbow*, modelo CLX02LF1Z. Este acelerómetro MEMS (MicroElectroMechanical System) permite medir acelerações até ± 2 G, com uma sensibilidade de 0.997 V/G, num intervalo de frequências compreendido entre 0 e 50 Hz [1]. A alimentação do acelerómetro foi realizada através de uma pilha de 9 V, sendo possível a utilização de tensões de 6 a 30 V. Na figura 6.3 mostra-se o acelerómetro electrónico utilizado. Este apresenta uma saída analógica, proporcional ao valor da aceleração, que é convertida para digital por uma placa de aquisição USB6008 da *National Instruments*, ligada a um computador portátil. De modo a facilitar a comparação entre sinais, os dados do acelerómetro electrónico foram recolhidos com uma taxa de amostragem de 200 Hz.

Os sensores, electrónico e óptico, foram ligados rigidamente a uma placa metálica robusta com aproximadamente 5 kg, assumindo-se que o movimento da placa metálica acompanha o movimento da ponte pedonal no ponto de medida. A figura 6.4 ilustra o esquema experimental utilizado, a posição dos acelerómetros e o ponto de aplicação dos impulsos.



Figura 6.3: Acelerómetro electrónico utilizado como referência.

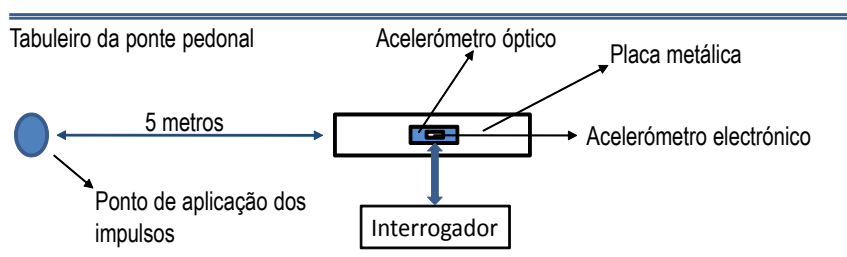


Figura 6.4: Esquema da montagem experimental utilizada na recolha de acelerações verticais.

Os resultados apresentados nesta secção foram obtidos em 10 de Setembro de 2009, com o salto simultâneo de 3 pessoas num local próximo à posição dos sensores.

Na figura 6.5 apresentam-se os dados de aceleração ao longo do tempo, medidos com os dois sensores.

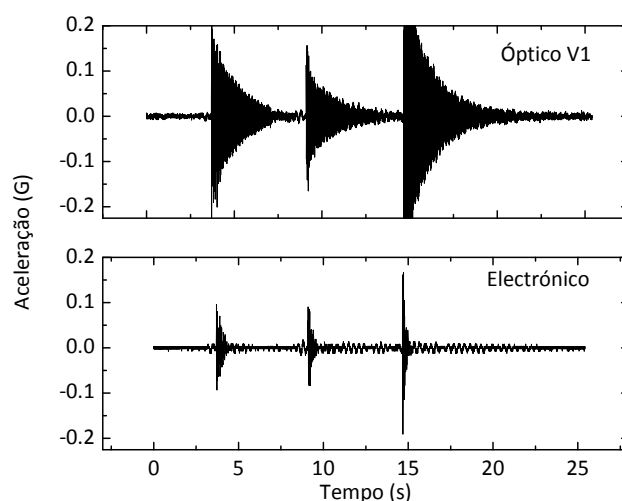


Figura 6.5: Dados registados com o sensor óptico e electrónico durante a aplicação de 3 impulsos verticais no tabuleiro da ponte.

Os dados da figura 6.5 revelam uma amplificação considerável do valor da aceleração por parte do acelerómetro óptico, no entanto, num estudo prévio realizado em [2] verificou-se que o limite de operação do acelerómetro electrónico seria cerca de 30 Hz. Deste modo aplicou-se um filtro digital (passa-baixo com uma frequência de corte de 40 Hz) aos dados registados pelo sensor óptico. Na figura 6.6 são apresentados os dados recolhidos com os dois tipos de sensores, óptico e electrónico, tendo sido os primeiros filtrados a 40 Hz. Deste modo é possível comparar o sinal obtido com os dois sensores. Usando agora o sinal do acelerómetro óptico filtrado, as evoluções das acelerações medidas com os dois sensores são concordantes em termos temporais e de amplitude. Esta afirmação é ainda corroborada pela análise dos dados da figura 6.7, onde se mostra os dados referentes ao intervalo temporal entre 8 e 10 segundos dos dados da figura 6.6.

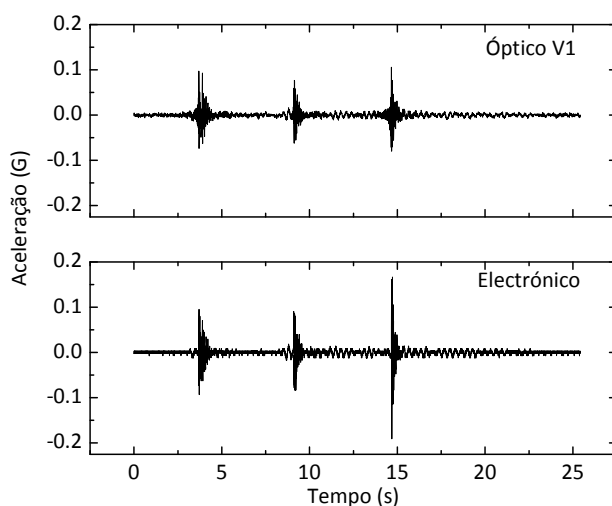


Figura 6.6: Aceleração vertical registada com o sensor óptico e electrónico durante a aplicação de 3 impulsos no tabuleiro da ponte. Os dados do sensor óptico apresentados foram filtrados a 40 Hz.

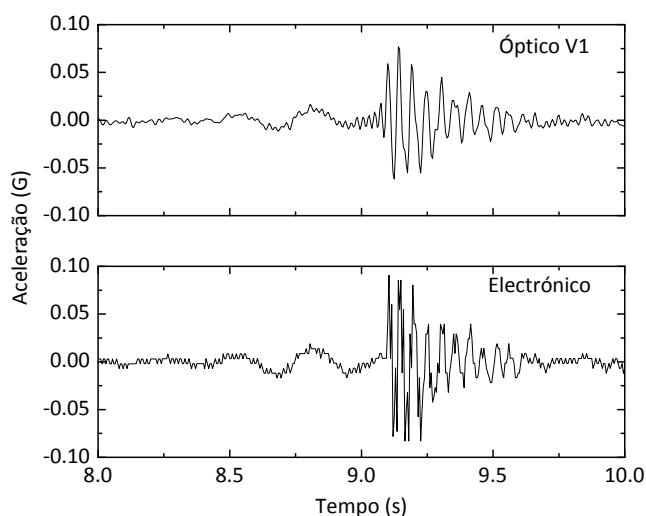


Figura 6.7: Região temporal correspondente ao intervalo temporal de 8 a 10 segundos dos dados apresentados na figura 6.6.

As frequências próprias verticais da estrutura são obtidas por *peak-picking* no espectro de frequências, obtido pela transformada de Fourier, dos dados de aceleração ao longo do tempo. Na figura 6.8 mostra-se o espectro de frequências resultante dos dados de aceleração apresentados na figura 6.5.

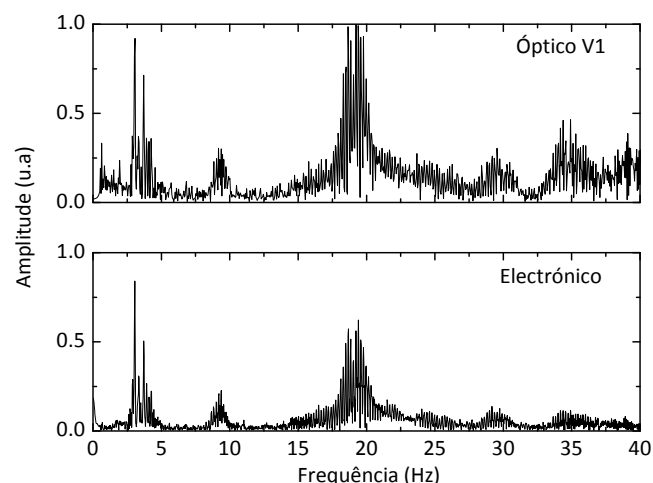


Figura 6.8: Espectro de frequências dos dados de aceleração registados na direcção vertical.

Na figura 6.9 apresenta-se o espectro de frequências da figura 6.8, para uma banda espectral compreendida entre 0 e 10 Hz, que permite uma melhor visualização e identificação do valor das primeiras frequências próprias associadas a modos verticais da estrutura.

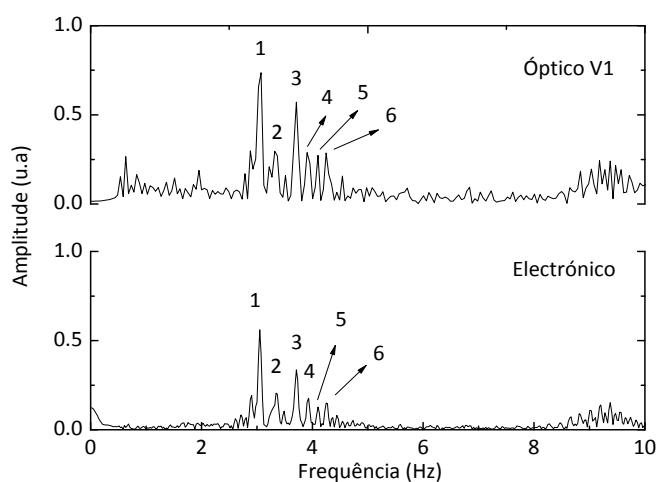


Figura 6.9: Espectro de frequências até 10 Hz, com indicação das frequências identificadas.

Na tabela 6.1 apresentam-se os valores encontrados para as primeiras frequências próprias verticais da ponte pedonal.

Modo	Frequência (Hz)		Erro relativo (%)
	Acelerómetro Óptico	Acelerómetro Electrónico	
1	3.076	3.052	0.799
2	3.320	3.345	0.729
3	3.711	3.711	< 0.001
4	3.906	3.931	0.621
5	4.102	4.102	< 0.001
6	4.248	4.248	< 0.001

Tabela 6.1: Frequências próprias verticais determinadas a partir dos dados de aceleração registados em 2009.

Verifica-se que existe um erro máximo inferior a 0.8 % na obtenção das frequências próprias da estrutura com os dados medidos com o acelerómetro óptico, relativamente ao valor das frequências próprias obtidas com recurso às medições com o acelerómetro electrónico.

Na tabela 6.2 apresentam-se os valores das primeiras frequências próprias verticais da ponte pedonal, com medições realizadas em 2007, no âmbito de uma dissertação de mestrado [2]. Neste caso os dados de aceleração foram obtidos com recurso ao acelerómetro óptico modelo V1, no entanto foi utilizado um sistema de interrogação próprio e desenvolvido em [2, 3]. De modo a validar os dados obtidos foram ainda recolhidos dados com um acelerómetro electrónico e com um sismógrafo. Verifica-se que, mesmo com um sistema de interrogação diferente, o acelerómetro óptico identificou as frequências próprias da estrutura com um erro relativo inferior a 0.7 %. Este facto comprova o funcionamento adequado do acelerómetro óptico para este tipo de estruturas.

Modo	Frequência (Hz)			Erro relativo (%)
	Acelerómetro Electrónico	Sismógrafo	Acelerómetro Óptico	
1	3.0273	3.0273	3.0215	0.1916
2	3.3691	3.3691	3.3489	0.6013
3	3.7109	3.7109	3.7014	0.2573
4	3.9307	3.9307	3.9280	0.0674
5	19.9707	19.9707	20.0429	0.3615

Tabela 6.2: Frequências próprias verticais determinadas em 2007 [2].

6.4 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS TRANSVERSAIS E LONGITUDINAIS

As frequências próprias longitudinais e transversais foram obtidas durante um ensaio realizado a 3 de Março de 2011, com recurso a um sensor óptico biaxial baseado em redes de Bragg

desenvolvido e apresentado no Capítulo 4. Como referência foi utilizado um sismógrafo da marca *GeoSig*, modelo GSR18.

O acelerómetro óptico foi rigidamente acoplado à placa metálica utilizada nos ensaios descritos na secção anterior, podendo-se assim assumir que os movimentos do acelerómetro óptico acompanham os movimentos da estrutura no ponto de medida, isto é, na secção a meio do comprimento total da ponte pedonal. O sismógrafo foi colocado numa posição adjacente à posição da placa metálica. A excitação da estrutura foi induzida por aplicação de 5 impulsos mecânicos por meio do salto simultâneo de 3 pessoas num ponto próximo da localização dos sensores.

O sistema de interrogação utilizado para recolha dos dados de aceleração ao longo do intervalo temporal de 40 segundos, onde ocorreu a excitação, consiste numa fonte de luz de emissão espontânea (*Amplified Spontaneous Emission*, ASE), um circulador óptico e um espectrómetro da marca *Ibsen*, modelo I-Mon E-USB, de acordo com o que se mostra na figura 6.10.

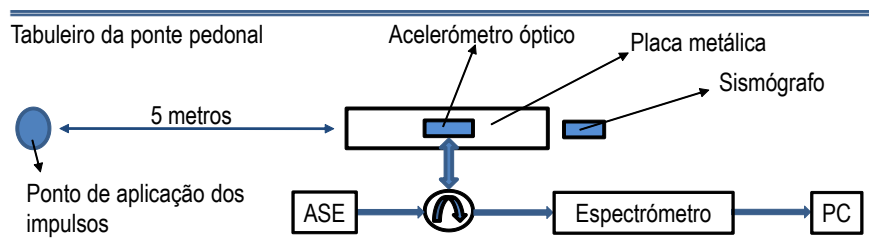


Figura 6.10: Esquema da montagem experimental utilizada na recolha de acelerações longitudinais e transversais.

A taxa de amostragem no caso do acelerómetro óptico foi de 900 Hz e para o sismógrafo de 250 Hz. Posteriormente, interpolou-se os dados do sensor óptico de modo a que o número de pontos coincidissem com o número de pontos dos dados registados com o sismógrafo, para a mesma região temporal. Verificou-se que o sismógrafo utilizado atenua os sinais com frequências superiores a 50 Hz, deste modo aplicou-se um filtro digital passa-baixo com frequência de corte de 50 Hz aos dados do sensor óptico, permitindo a comparação dos resultados entre os dois sensores. Nas figuras 6.11 e 6.12 apresentam-se os dados registados na direcção longitudinal com ambos os sensores. De modo a facilitar a comparação do sinal dos dois sensores durante a aplicação dos impulsos mecânicos, na figura 6.12 apenas são mostrados os intervalos temporais referentes a dois impulsos.

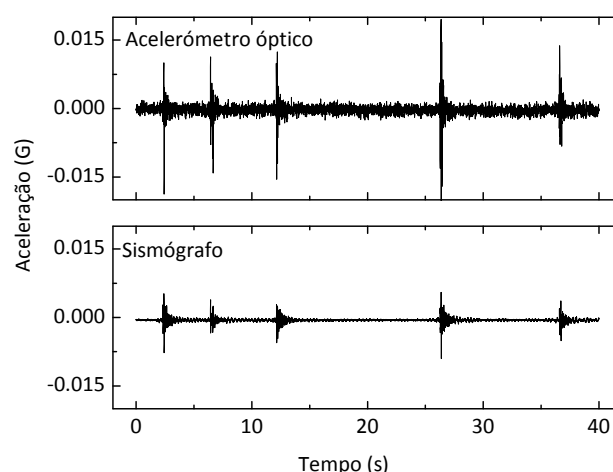


Figura 6.11: Dados registados com o sensor óptico (filtrados a 50 Hz) e com o sismógrafo na direcção longitudinal, durante a aplicação de 5 impulsos verticais no tabuleiro da ponte.

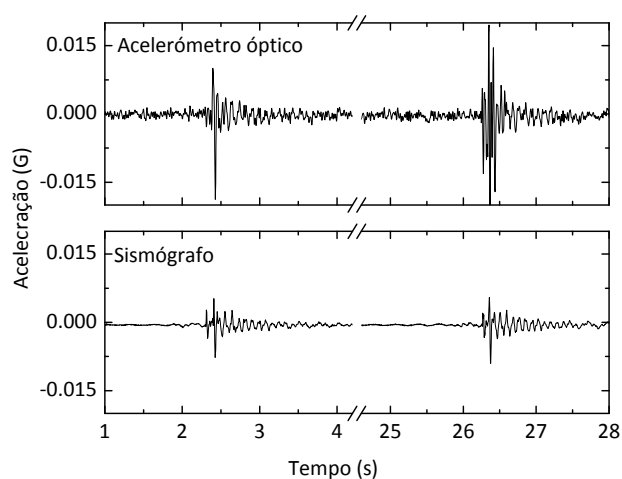


Figura 6.12: Regiões temporais de 1 a 4 segundos e de 25 a 28 segundos, dos dados apresentados na figura 6.11, correspondentes à aceleração na direcção longitudinal.

Da análise aos dados das figuras 6.11 e 6.12, verifica-se que a resposta do acelerómetro óptico, relativamente à resposta do sismógrafo, tem muito boa correspondência temporal, no entanto em termos de amplitude revela-se mais sensível.

A determinação do valor das frequências próprias longitudinais é realizada por *peak-picking* do espectro de frequências obtido por transformada de Fourier dos dados de aceleração longitudinal ao longo do tempo. Na figura 6.13 é apresentado o espectro de frequências, dos dados de aceleração longitudinal ao longo do tempo, mostrados na figura 6.11.

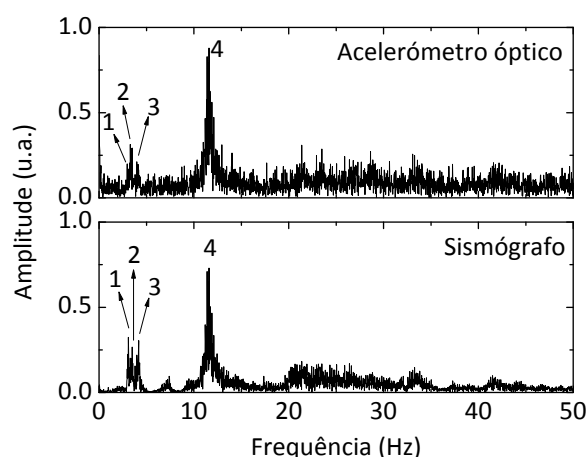


Figura 6.13: Espectro de frequências dos dados de aceleração registados na direcção longitudinal.

Na tabela 6.3 encontram-se resumidos os valores das frequências próprias longitudinais obtidas por análise da figura 6.13. Na mesma tabela mostra-se também o erro relativo encontrado entre o valor medido com o acelerómetro óptico e o sismógrafo, para cada frequência própria.

Modo	Frequência própria (Hz)		
	Acelerómetro óptico	Sismógrafo	Erro relativo (%)
1	2.975	3.099	4.001
2	3.299	3.499	5.716
3	4.125	4.175	1.198
4	11.599	11.599	< 0.004

Tabela 6.3: Frequências próprias longitudinais determinadas a partir dos dados de aceleração registados na figura 6.11.

As frequências obtidas com recurso ao acelerómetro óptico apresentam um erro máximo de 5.7 %, relativamente aos dados obtidos com o sismógrafo, na obtenção das frequências próprias longitudinais da ponte pedonal.

Simultaneamente aos dados registados longitudinalmente, analisaram-se os dados de aceleração obtidos na direcção transversal, para os mesmos impulsos aplicados. Na figura 6.14 são apresentados os dados de aceleração registados ao longo do tempo, durante um intervalo temporal de 40 segundos, para a direcção transversal.

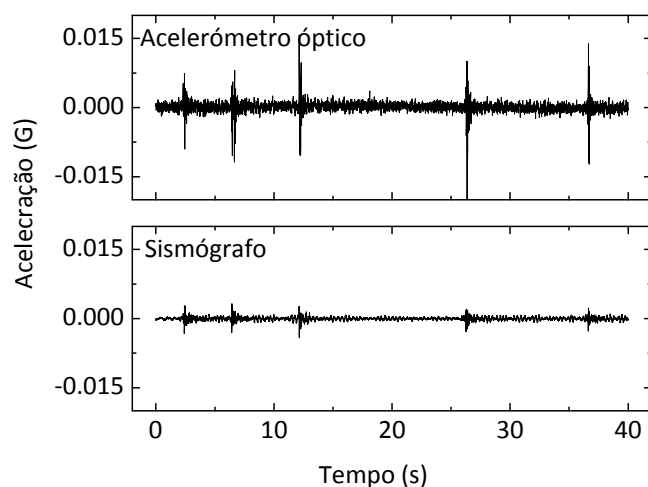


Figura 6.14: Dados registados com o sensor óptico (filtrados a 50 Hz) e com o sismógrafo na direcção transversal, durante a aplicação de 5 impulsos verticais no tabuleiro da ponte.

Na figura 6.15 mostra-se a região temporal de 1 a 5 segundos da figura 6.14, para melhor análise de um dos impulsos aplicados e para comparação do sinal obtido com os dois sensores.

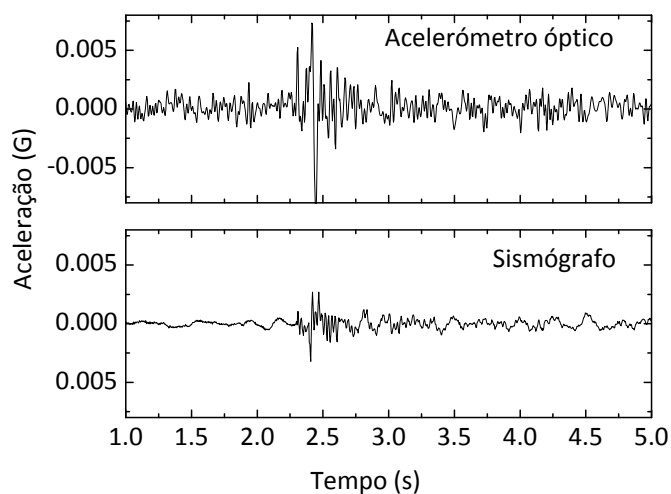


Figura 6.15: Região temporal de 1 a 5 segundos dos dados apresentados na figura 6.14.

Os dados apresentados na figura 6.16 foram obtidos por transformada de Fourier dos dados de aceleração transversal ao longo do tempo, apresentados na figura 6.14. Estes resultados permitem identificar as frequências próprias transversais da estrutura. Na figura 6.17 mostra-se o espectro de frequências da figura 6.16 para uma região espectral de 0 a 10 Hz, para melhor identificação e comparação das frequências próprias.

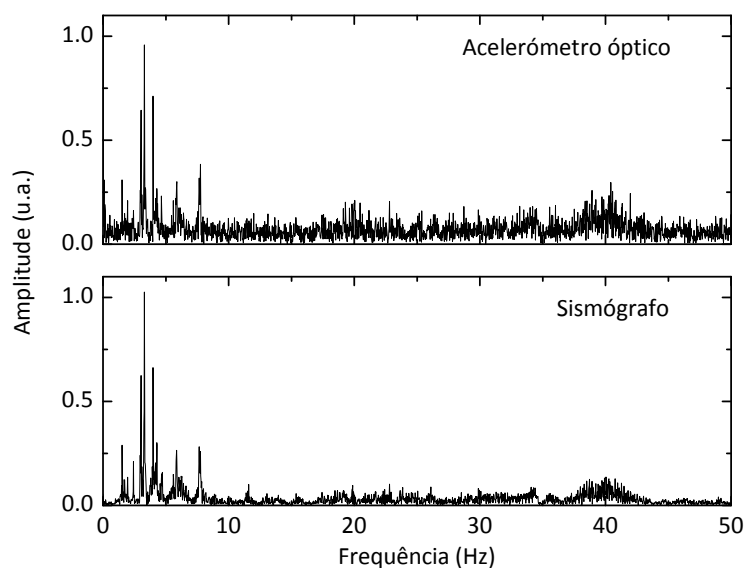


Figura 6.16: Espectro de frequências dos dados de aceleração registados na direcção transversal.

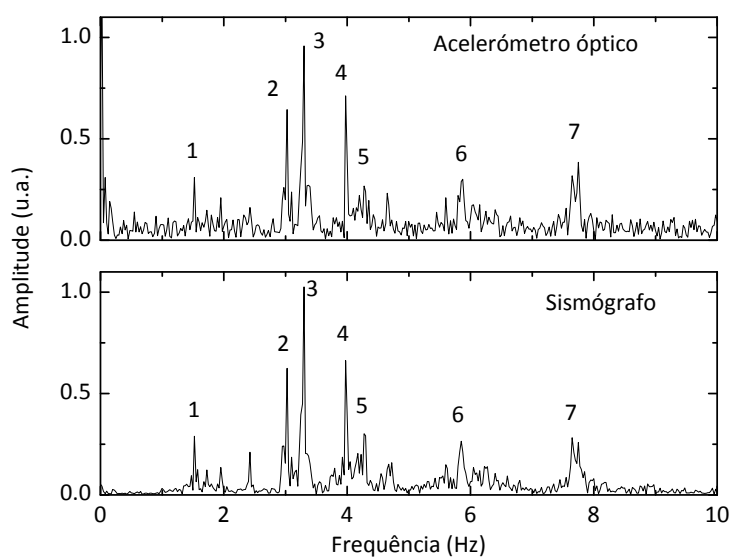


Figura 6.17: Espectro de frequências dos dados de aceleração registados na direcção transversal, de 0 a 10 Hz.

Na tabela 6.4 encontram-se resumidos os valores das frequências próprias transversais obtidas por análise da figura 6.17. Na mesma tabela mostra-se também o erro relativo encontrado entre o valor obtido com as medidas do acelerómetro óptico e do sismógrafo, para cada frequência própria.

Modo	Frequência própria (Hz)		
	Acelerómetro óptico	Sismógrafo	Erro relativo (%)
1	1.524	1.524	< 0.033
2	3.025	3.025	< 0.016
3	3.299	3.299	< 0.015
4	3.975	3.975	< 0.012
5	5.849	5.849	< 0.008
7	7.649	7.649	< 0.006

Tabela 6.4: Frequências próprias transversais determinadas a partir dos dados de aceleração registados na figura 6.14.

Pela análise dos dados da figura 6.17 e da tabela 6.4 as frequências obtidas com recurso ao acelerómetro óptico implementado coincidem com as frequências obtidas com o sismógrafo de referência, comprovando o funcionamento adequado do sensor óptico.

6.5 EVOLUÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS DA ESTRUTURA

A comparação do valor da frequência própria de uma estrutura com dados recolhidos ao longo do tempo é fundamental na avaliação da evolução do seu desempenho estrutural. Alterações no valor da frequência própria podem indicar perda de rigidez e/ou perda ou aumento de massa. No entanto, alterações de temperatura podem também levar a alterações no valor da frequência própria, pelo que este efeito deve ser tido em consideração. Na figura 6.18 mostra-se a evolução do valor da primeira frequência própria da estrutura estudada para o primeiro modo de oscilação vertical, longitudinal e transversal.

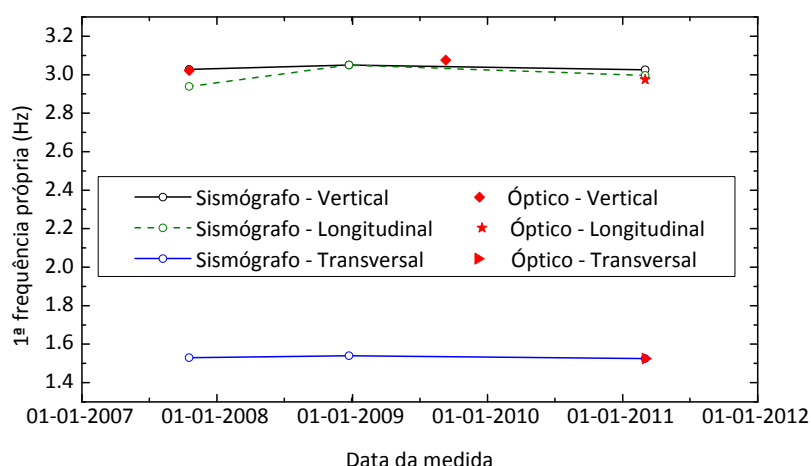


Figura 6.18: Evolução do valor da primeira frequência própria da ponte pedonal para o primeiro modo de vibração vertical, longitudinal e transversal.

Em Dezembro de 2008 foram realizadas medidas de aceleração na ponte pedonal com recurso a um sismógrafo, no âmbito da disciplina de Dinâmica de Estruturas do curso de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. O resultado dessas medições foi considerado neste trabalho de modo a verificar a evolução do valor da primeira frequência natural da estrutura nas várias direcções ortogonais, em conjunto com os dados obtidos em 2007 e 2011. Na tabela 6.5 compara-se o valor da primeira frequência própria vertical, longitudinal e transversal da ponte pedonal, obtida a partir dos dados de aceleração recolhidos com sismógrafo em 2007, 2008 e em 2011.

1ª frequência	Frequência (Hz)			Diferença (2011-2007) (Hz)	Diferença (2011-2007) (%)
	18-10-2007	23-12-2008	03-03-2011		
Vertical	3.027	3.050	3.026	-0.001	-0.033
Longitudinal	2.938	3.050	2.996	0.058	1.974
Transversal	1.530	1.540	1.525	-0.005	-0.327

Tabela 6.5: Frequências próprias verticais determinadas a partir dos dados de aceleração registados com o sismógrafo em 2007, 2008 e em 2011.

A análise dos dados apresentados na tabela 6.5 e na figura 6.18 revela que o valor da primeira frequência própria se mantém estável nos modos de vibração vertical, longitudinal e transversal, indicando que não há diminuição significativa da rigidez da estrutura e por isso degradação. Não sendo significativa a sua variação, mesmo considerando o facto das medidas terem sido realizadas em condições de temperatura ambiental eventualmente diferentes, conclui-se que não existe degradação considerável da estrutura neste período, tendo em conta que não existiu alteração física da estrutura no intervalo temporal considerado que levasse a uma alteração de rigidez ou massa da estrutura.

Para uma análise mais completa recomenda-se a realização de um número mais significativo de medidas ao longo de um período de tempo maior e a observação do comportamento da estrutura ao longo desse mesmo intervalo temporal. Deste modo, oscilações do valor da frequência própria devido ao efeito da temperatura serão facilmente identificadas. Pela análise da variação das restantes frequências próprias verticais, que se apresentam na tabela 6.6, verifica-se que não existe uma tendência evidente de decréscimo ou aumento do valor das frequências próprias, o que reforça a ideia de que eventuais variações se devem a flutuações térmicas nos diferentes instantes de medida.

Modo	Frequência (Hz)			
	2007	2009	Diferença (Hz)	Diferença (%)
1	3.021	3.076	0.055	1.788
2	3.349	3.320	-0.029	-0.873
3	3.701	3.711	0.010	0.269
4	3.928	3.906	-0.022	-0.563

Tabela 6.6: Frequências próprias verticais determinadas a partir dos dados de aceleração registados com o acelerómetro óptico em 2007 e em 2009.

6.6 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados de aceleração vertical, longitudinal e transversal obtidos com sensores ópticos e electrónicos, com o intuito de determinar as frequências próprias de uma ponte pedonal segundo estas três direcções, e de verificar a aplicabilidade de sensores ópticos neste tipo de estruturas metálicas treliçadas. Apesar do elevado número de frequências próprias próximas, constatou-se que os sensores ópticos são apropriados para a sua determinação, com um erro bastante baixo relativamente a soluções baseadas em tecnologia electrónica convencional. Foi ainda estudada a evolução do valor da primeira frequência própria nas três direcções desde 2007 até 2011, verificando-se não existir uma variação significativa do valor das frequências próprias estimadas. Tendo em conta que não foram efectuadas alterações estruturais na ponte pedonal no intervalo temporal considerado, conclui-se que não houve evolução do estado de degradação da estrutura, no entanto é relevante e aconselhável futuramente o acompanhamento do valor das frequências próprias ao longo do tempo.

6.7 REFERÊNCIAS

- [1] Crossbow Inertial Systems, Accelerometers LF series.
Available: <http://www.xbow.com>,
- [2] P. Antunes, "Análise dinâmica de estruturas com sensores de Bragg", Dissertação de Mestrado, Departamento de Física, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2007.
- [3] P. F. da Costa Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. de Lemos Pinto, R. N. Nogueira, H. Varum, A. G. Costa and P. S. de Brito André, "Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring", *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 1347-1354, 2009.

Capítulo 7

Monitorização do comportamento dinâmico de torres de radiocomunicações

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são descritos ensaios dinâmicos, não-destrutivos, realizados em duas torres de radiocomunicações localizadas na região de Aveiro. A monitorização foi efectuada com recurso a um sensor óptico de aceleração bidireccional implementado, com base em redes de Bragg gravadas em fibra óptica.

Durante os ensaios foram realizadas medidas dinâmicas de aceleração enquanto da aplicação de impulsos mecânicos horizontais nas torres. Foram ainda recolhidos dados de aceleração ao longo do tempo com ruído ambiente (vento) e com a passagem de um comboio na proximidade de uma das torres. A partir dos dados de aceleração ao longo do tempo foi possível estimar as frequências próprias das estruturas, as quais foram comparadas com os resultados obtidos por simulação numérica.

7.2 DESCRIÇÃO DAS ESTRUTURAS ESTUDADAS

As torres são um dos suportes físicos mais importantes para a instalação de equipamentos de radiocomunicações usados para a emissão de ondas electromagnéticas, que permitem vários serviços, tais como rádio, televisão e comunicações móveis. Infelizmente, o número de anomalias observadas em tais estruturas é elevado em comparação com outras estruturas de igual importância económica e social. Um grande número das anomalias observadas é devido a erros de concepção, resultando em estruturas com menores níveis de segurança que podem até conduzir ao seu colapso [1-5]. Sobretudo por razões económicas e funcionais da sua própria natureza, as torres são estruturas leves, esbeltas e flexíveis. Tendencialmente, a maior resistência de novos materiais utilizados na sua construção e, conseqüentemente, as alterações associadas na distribuição de massa, rigidez e amortecimento deveriam ser consideradas na análise da influência da acção do vento. A resposta em ressonância torna-se importante quando essas estruturas têm frequências próprias abaixo de 1 Hz. Portanto, a análise dinâmica é necessária para determinar a resposta em ressonância, que pode ser significativa.

Em tais estruturas, a monitorização é essencial para a avaliação da sua integridade e garantia do seu tempo de vida útil. Um parâmetro importante a ser monitorizado é a aceleração, a partir do qual as frequências próprias da estrutura podem ser obtidas. O valor das frequências próprias e a sua diminuição está muitas vezes relacionado com a degradação da estrutura, podendo ser usado como indicador da sua integridade, permitindo agir preventivamente, se necessário, minimizando os custos e evitando a perda de vidas humanas associadas a eventuais colapsos. Enfatizando a importância da monitorização da saúde estrutural e todos os aspectos mencionados acima, na figura 7.1 apresenta-se o colapso total de um monopolo de aço com secção poligonal [5].

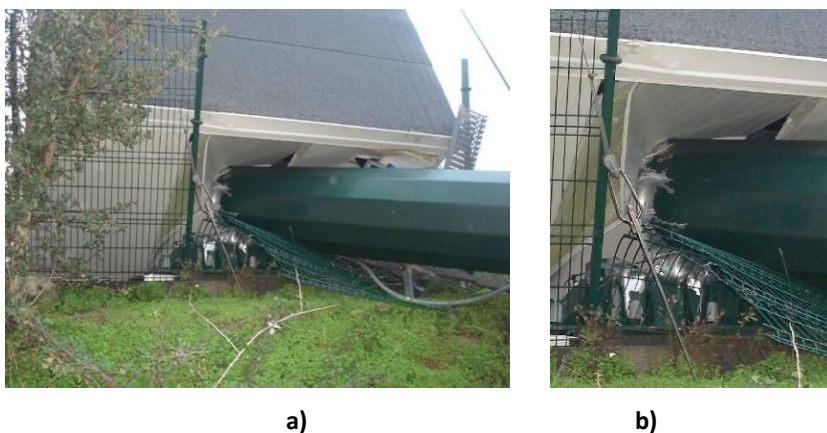


Figura 7.1: a) Colapso total de um monopolo em aço com secção poligonal e b) detalhe da base [5].

Os acelerómetros electrónicos podem, em alguns casos de monitorização, ser usados. No entanto, o elevado nível de radiação electromagnética no topo das torres, na proximidade das antenas, pode conduzir a resultados errados e interferir com a operação rádio em serviço, com perdas económicas para o operador. Uma abordagem alternativa é a utilização de instrumentação totalmente óptica, tal como a proposta neste trabalho, baseada em redes de Bragg. O acelerómetro utilizado é baseado na tecnologia FBG e toma partido de todas as suas vantagens, tais como: imunidade a interferências electromagnéticas, não interferindo no funcionamento das antenas; possibilidade de ser multiplexado numa rede de sensores (aceleração, tensão, deformação, pressão, velocidade, etc.) numa mesma fibra óptica, reduzindo a necessidade de um elevado número de cabos mais pesados; possibilidade de monitorização remota, pois a fibra apresenta atenuação muito baixa; devido ao tamanho e volume reduzidos são adequados para ser incorporados nas estruturas com reduzido impacto visual e sem intrusão [6-8].

A tipologia das torres varia consideravelmente entre países, como consequência da finalidade de uso e acções a que estão sujeitas. Neste trabalho foram escolhidos dois monopólos distintos instalados na região de Aveiro, em Portugal, com 50 m de altura, apresentados na figura 7.2.



Figura 7.2: Torres de comunicações estudadas. a) TWR01; b) TWR02.

O primeiro monopolo (TWR01) é formado por cinco módulos de aço com secção transversal variando em altura. As secções tubulares são unidas por ligações aparafusadas. Este monopolo encontra-se fixo a um bloco de fundação de betão armado com dimensões 4.00 x 4.00 m em planta e com 2.25 m de altura.

O segundo monopolo (TWR02) é constituído por sete módulos, com secção transversal hexadecagonal, com dimensões da secção transversal variáveis em altura. Os módulos são unidos por ajuste forçado, que é conseguido com o pré-esforço de cabos de aço. O monopolo é fixo na sua base a um bloco de fundação de betão armado semi-profundo com as dimensões 3.30 x 3.30 m em planta e 3.60 m de altura.

7.3 MONTAGEM EXPERIMENTAL

Para os ensaios, o acelerómetro óptico biaxial, baseado em FBGs, foi fixo num sistema de suporte rígido de aço e montado no topo da torre. Foram utilizados dois tipos de suporte, de acordo com as características e detalhes estruturais do topo das torres em estudo, e de modo a facilitar a instalação do sensor. Um dos suportes apresenta furação que torna possível a sua fixação por meio de parafusos, este método foi adoptado na fixação à TWR01, pois esta apresenta a possibilidade de fixação com estas características. Na TWR02 não era possível a fixação por meio de parafusos pelo que se adoptou uma fixação por meio de fitas metálicas de aço. As fitas abraçam a torre na secção que se pretende monitorizar, sendo tensionadas até se garantir uma ligação suficientemente rígida. Na figura 7.3 mostram-se as peças de ligação do acelerómetro às torres.

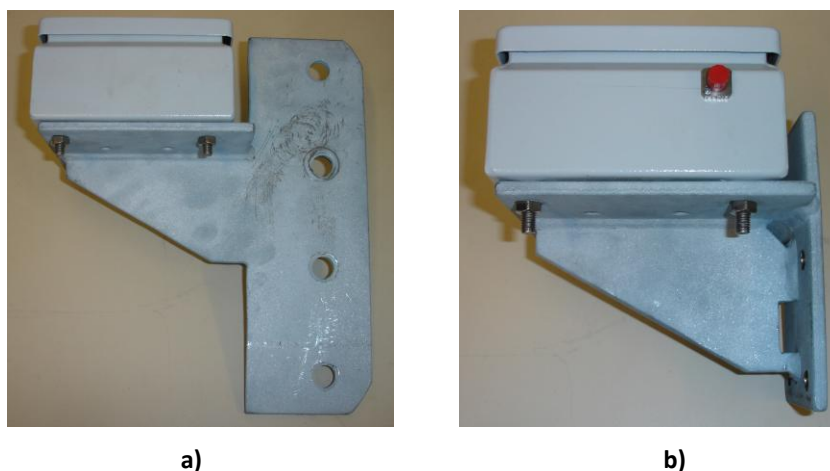


Figura 7.3: Peças de ligação do acelerómetro às torres:
a) Peça de ligação usada na torre TWR01; b) Peça de ligação usada na torre TWR02.

A instalação do equipamento de monitorização é ilustrado na figura 7.4 e consiste numa fonte óptica de banda larga ALS-CL-17-B-FA da *Amonics*, um circulador óptico e um espectrómetro da *Ibsen*, modelo I-MON E, com uma taxa de amostragem de 950 Hz.

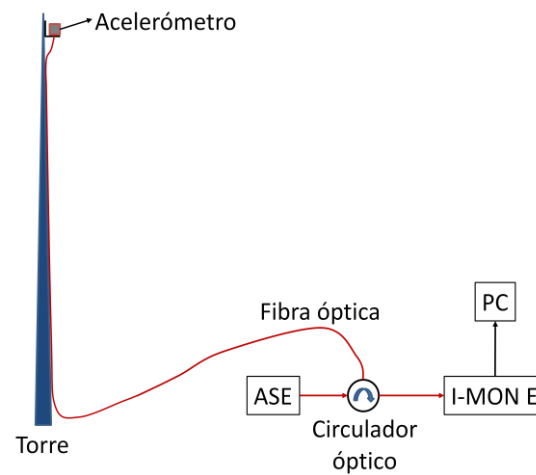


Figura 7.4: Esquema da montagem experimental adoptado.

A figura 7.5 mostra uma fotografia do acelerómetro óptico instalado no topo da torre TWR02, fixo por meio de fitas metálicas.



Figura 7.5: Sensor instalado na torre TWR02, fixo com fitas metálicas.

As figuras 7.6 a) e b) mostram imagens das torres e as direcções de medida, respectivamente para as torres TWR01 e TWR02.



Figura 7.6: a) Fotografia aérea da torre TWR01 (obtida pelo Google Maps em 29 de Março de 2011) com indicação das direcções de medida; b) fotografia aérea da torre TWR02 (obtida pelo Bing Maps em 7 de Março de 2011) e indicação das direcções de medida.

Os trabalhos de monitorização tiveram uma duração inferior a 3 horas em cada torre, incluindo escalada, montagem do sensor, instalação, configuração das medições, desmontagem e descida de técnicos e equipamentos.

7.4 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS POR EXCITAÇÃO EXTERNA

O acelerómetro biaxial óptico permitiu medir a história temporal de aceleração em duas direcções horizontais independentes. Foram obtidos resultados de aceleração ao longo do tempo durante a aplicação de impulsos mecânicos horizontais em vários pontos da torre. Destes resultados, e por transformada de Fourier, foi possível estimar as frequências próprias das estruturas. Na figura 7.7 mostram-se os dados de aceleração obtidos durante a aplicação de impulsos mecânicos horizontais aplicados a meia altura da torre TWR01 e os respectivos espectros de frequências, para as duas direcções sensíveis.

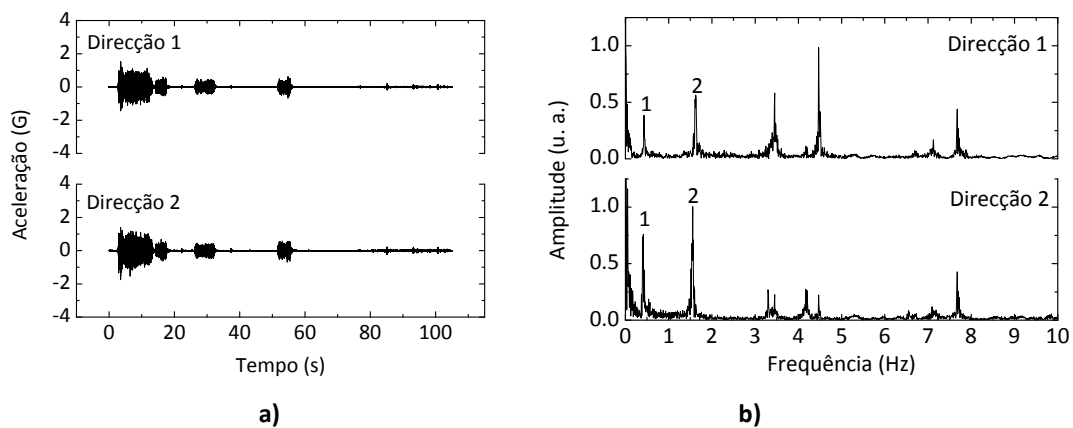


Figura 7.7: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos dos dados de aceleração registados na torre TWR01, para impulsos aplicados a meia altura da torre.

Na figura 7.8 mostram-se os dados de aceleração registados ao longo do tempo, e os respectivos espectros de frequências, quando são aplicados impulsos mecânicos a meia altura da torre TWR02.

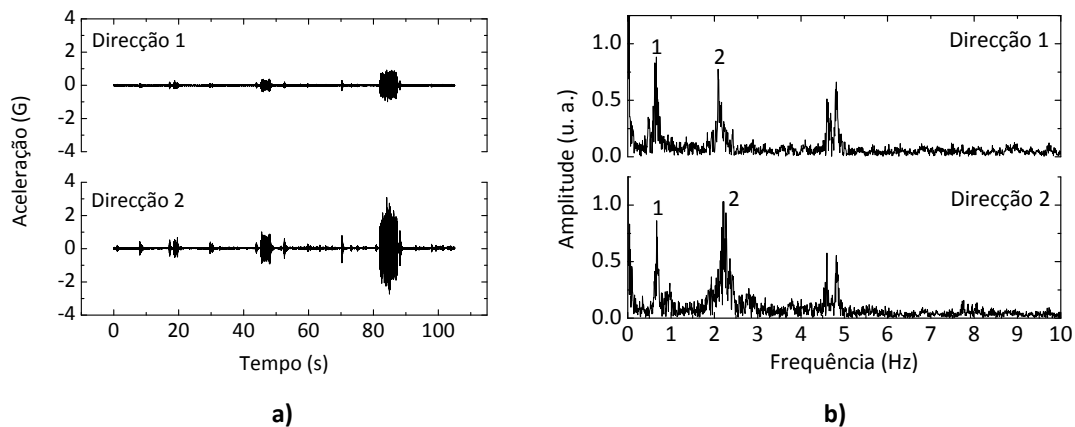


Figura 7.8: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos dos dados de aceleração registados na torre TWR02, para impulsos aplicados a meia altura da torre.

Na figura 7.9 apresentam-se os dados de aceleração obtidos durante a aplicação de pequenos impulsos mecânicos horizontais aplicados a cerca de 2 metros abaixo do topo da torre TWR01. Os espectros de frequências obtidos a partir dos dados da figura 7.9 a) são apresentados na figura 7.9 b).

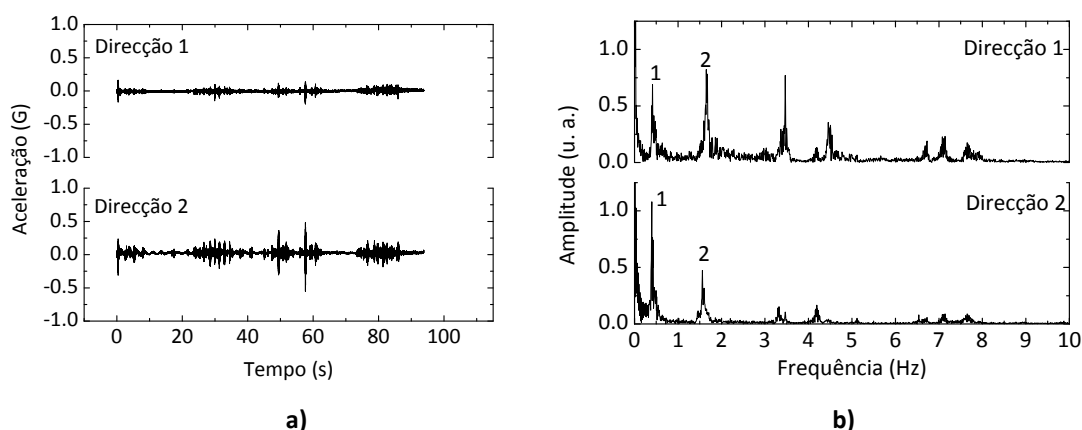


Figura 7.9: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos a partir dos dados de aceleração registados na torre TWR01, para impulsos aplicados a 2 m do topo da torre.

Na figura 7.10 a) e b) apresentam-se os dados de aceleração e os espectros de frequências dos mesmos, respectivamente, para a situação em que a excitação externa é aplicada por meio de impulsos mecânicos aplicados a dois metros do topo da torre TWR02.

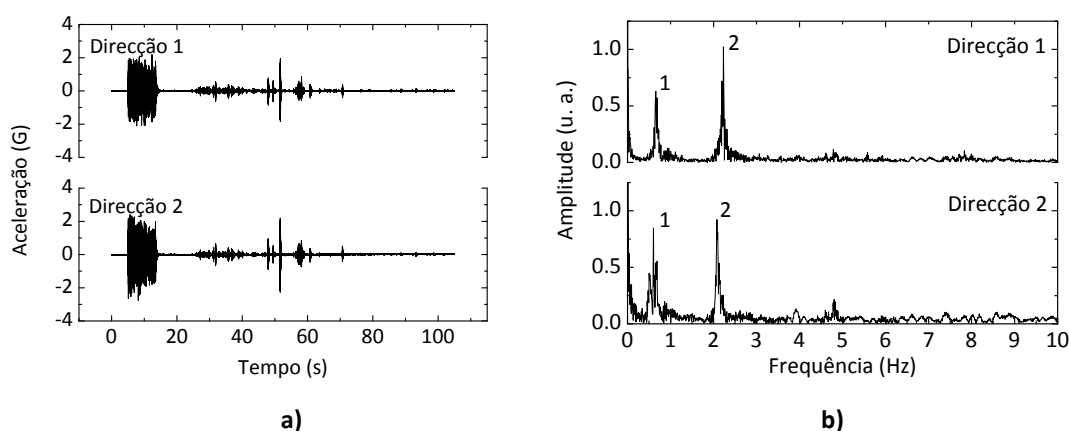


Figura 7.10: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos a partir dos dados de aceleração registados na torre TWR02, para impulsos a 2 m do topo da torre.

Na tabela 7.1 encontram-se resumidos os valores das frequências próprias obtidas experimentalmente nas situações em que a excitação externa é aplicada no topo da torre e a meia altura, para as duas torres e nas duas direcções para as quais o acelerómetro é sensível.

Frequência na direcção 1 (Hz)				
Modo	TWR01		TWR02	
	1/2 altura	2 m do topo	1/2 altura	2 m do topo
1	0.429	0.414	0.661	0.661
2	1.628	1.562	2.085	2.078

Frequência na direcção 2 (Hz)				
Modo	TWR01		TWR02	
	1/2 altura	2 m do topo	1/2 altura	2 m do topo
1	0.414	0.399	0.668	0.603
2	1.555	1.562	2.216	2.078

Tabela 7.1: Frequências próprias das torres TWR01 e TWR02, obtidas experimentalmente para as situações em que os impulsos são aplicados a meia altura e a 2 m do topo da torre.

Verifica-se que os valores de frequências próprias encontradas são consistentes, independentemente do ponto onde é aplicada a excitação externa, apresentando apenas pequenas diferenças. Estas poderão estar relacionadas com o método simplificado (*peak-picking*) utilizado na sua obtenção a partir do espectro de frequências, ou com variações de temperatura entre os instantes de medida. Existem métodos mais completos e precisos no tratamento dos dados de aceleração que permitem distinguir estes mesmos efeitos [9]. No entanto, o método utilizado, pela sua simplicidade e rapidez de aplicação, é considerado apropriado para a validação da utilização dos sensores apresentados.

7.5 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS COM EXCITAÇÃO AMBIENTE

Para certas estruturas, a determinação das frequências próprias a partir da medição de vibrações provocadas pelo ruído ambiente permite registar informação útil para a sua caracterização dinâmica. Dada a localização da torre TWR02, próxima de uma linha férrea, foi possível ainda determinar as frequências próprias, a partir dos dados de aceleração aquando da passagem de um comboio.

A linha férrea situa-se aproximadamente a 50 m da torre TWR02 e a vibração induzida pela passagem do comboio é claramente sentida na torre. Na figura 7.11 a) mostram-se os valores de aceleração registados no topo da torre TWR02, aquando da passagem do comboio. Na figura 7.11 b) apresentam-se os espectros de frequências obtidos através da transformada rápida de Fourier dos dados de aceleração da figura 7.11 a).

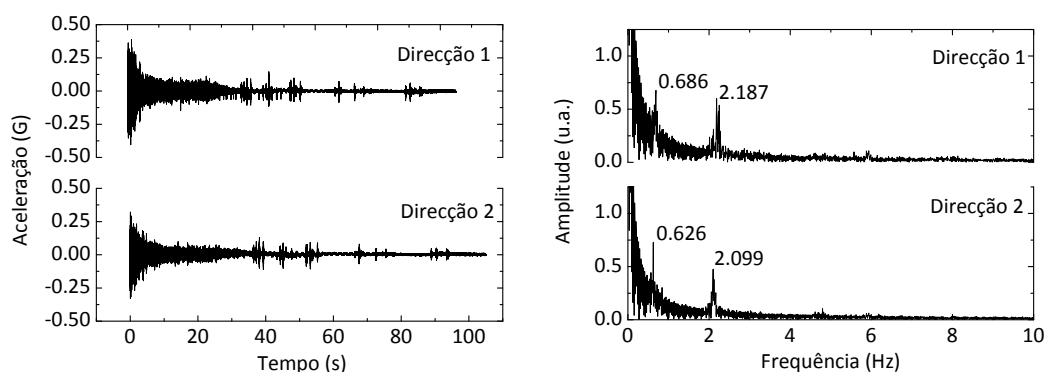


Figura 7.11: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos a partir dos dados de aceleração registados na torre TWR02, aquando da passagem de um comboio.

Os valores de frequência própria obtidos no caso da passagem de comboio são concordantes com os resultados encontrados no caso de excitação externa aplicada. Deste modo confirma-se que é possível obter as frequências próprias deste tipo de torres remotamente com o sensor proposto.

Para a caracterização dinâmica, a situação mais simples em termos de excitação consistirá no registo de acelerações na torre quando sujeita à acção puramente natural, tal como a acção do vento. Na figura 7.12 a) apresenta-se o registo de acelerações na torre TWR02, exposta unicamente à acção do vento. Na figura 7.12 b) apresentam-se os espectros de frequências obtidos por transformada de Fourier dos dados de aceleração registados.

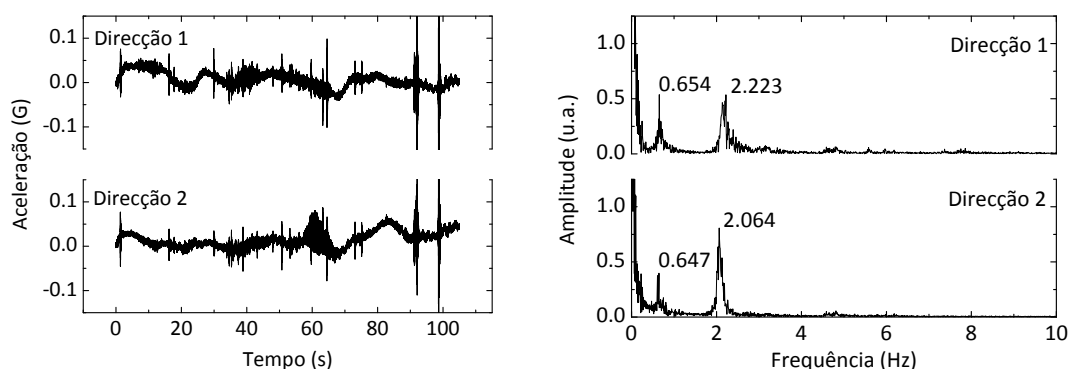


Figura 7.12: a) Dados de aceleração registados ao longo do tempo e b) espectros de frequências obtidos a partir dos dados de aceleração registados na torre TWR02, com a torre sujeita unicamente à acção do vento.

Modo	Frequência (Hz)			
	Passagem de comboio		Acção do vento	
	Direcção 1	Direcção 2	Direcção 1	Direcção 2
1	0.686	0.626	0.654	0.647
2	2.187	2.099	2.223	2.064

Tabela 7.2: Frequências próprias da torre TWR02, obtidas experimentalmente com excitação externa da acção do vento e aquando da passagem de um comboio.

Pela análise dos dados das figuras 7.11 e 7.12, e da tabela 7.2, verifica-se que é possível utilizar o sensor implementado para a monitorização remota das torres, apenas com a excitação própria do vento ou, quando aplicável, do tráfego ferroviário nas suas imediações.

7.6 COMPARAÇÃO DO VALOR DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS DAS TORRES COM VALORES OBTIDOS ATRAVÉS DE MODELOS NUMÉRICOS

O modelo de simulação do comportamento estrutural usado para este tipo de estruturas é simplesmente um *cantilever* com as respectivas características mecânicas e geométricas das secções transversais, sendo contabilizadas todas as massas, concentradas e distribuídas, associadas aos elementos estruturais e não estruturais, tais como plataformas, escadas, alimentadores e antenas. As frequências foram obtidas numericamente utilizando uma aplicação informática de análise estrutural com base no método dos elementos finitos [10]. A aplicação informática utilizada na simulação numérica das torres de telecomunicações estudadas foi o SAP2000 da *Computers and Structures, Inc.* [11].

A simulação numérica por elementos finitos permitiu obter os valores de frequências próprias para as torres TWR01 e TWR02 [10]. Os valores das frequências obtidas numericamente para os dois primeiros modos são apresentados na tabela 7.3, confrontando-se com os valores obtidos nas medições *in-situ*. Nesta tabela apresenta-se ainda o erro relativo entre ambos os valores. Os valores das frequências próprias obtidos experimentalmente, e que são apresentados sumariamente na tabela 7.3, correspondem à média dos valores experimentais apresentados nas tabelas 7.1 e 7.2.

Os valores medidos para as frequências próprias obtidas com o acelerómetro óptico biaxial correspondem a valores dentro dos limites esperados para este tipo de estruturas. Mais, os valores medidos são consistentes com os resultados obtidos com os modelos numéricos. De

acordo com os valores apresentados na tabela 7.3, para a torre TWR01 e na direcção 1, a diferença entre o valor medido (0.422 Hz) e simulado (0.464 Hz) é de 9.159 %. Para a torre TWR02, a diferença entre o valor medido (0.666 Hz) e o valor calculado (0.719 Hz) é de 7.441 %.

Para as primeiras frequências próprias correspondendo à direcção 2, a diferença entre valores medidos e calculados apresenta um erro relativo máximo de 12.392 % e 11.544 %, respectivamente para as torres TWR01 e TWR02.

Modo	Direcção	TWR01			TWR02		
		Experimental (Hz)	Simulado (Hz)	Erro %	Experimental (Hz)	Simulado (Hz)	Erro %
1	1	0.422	0.464	9.159	0.666	0.719	7.441
2		1.595	1.719	7.213	2.143	2.287	6.286
1	2	0.407	0.464	12.392	0.636	0.719	11.544
2		1.559	1.719	9.337	2.114	2.287	7.554

Tabela 7.3: Frequências próprias das torres TWR01 e TWR02 obtidas experimentalmente e por simulação com um programa de elementos finitos [10].

Verifica-se que o valor das frequências obtidas numericamente em todos os casos é superior ao valor medido experimentalmente, sendo este resultado indicativo de uma maior rigidez da estrutura no modelo numérico. Esta situação deve-se ao facto de no modelo numérico se ter considerado as torres perfeitamente encastradas na sua base. Na realidade, a fundação das torres tem alguma flexibilidade associada, o que tenderá a baixar o valor das frequências próprias, como comprovado com as medições experimentais. Contudo, considera-se eficaz a utilização do sensor desenvolvido neste tipo de estruturas.

7.7 CONCLUSÕES

Neste capítulo demonstrou-se a possibilidade de utilização de sensores ópticos na monitorização dinâmica de estruturas esbeltas, com vantagens relativamente à utilização de outro tipo de sensores.

Foram estudadas duas torres de radiocomunicações com 50 m de altura, nas quais foi utilizado o acelerómetro óptico bidimensional desenvolvido. A monitorização foi realizada com recurso a impulsos externos e a excitação própria, nomeadamente excitação por acção do vento e excitação

por acção da passagem de um comboio nas imediações da torre. Os resultados comprovam que, com excitação própria, é possível a utilização do sensor num sistema de monitorização remoto. Os resultados obtidos experimentalmente foram comparados com os resultados obtidos por simulação numérica, observando-se um erro relativo máximo de 12.392 %, relativamente à simulação numérica.

7.8 REFERÊNCIAS

- [1] B. Smith, *Communication Structures*. London: Thomas Telford, 2007.
- [2] B. Smith, "50 years in the design of towers and masts. From IASS recommendations to current procedures", *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 2009.
- [3] U. Støttrup-Andersen, "Analysis and design of masts and towers", *International Symposium on Lightweight Structures in Civil Engineering*, Warsaw, 2002.
- [4] U. Støttrup-Andersen, "Masts and towers", *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, 2009.
- [5] R. Travanca, "Radio communication towers. Pathologies and design", Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, 2010.
- [6] P. F. C. Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. L. Pinto, R. N. Nogueira, H. S. A. Varum, A. G. Costa and P. S. B. André, "Optical Fiber Accelerometer System for Structural Dynamic Monitoring", *IEEE Sensors Journal*, vol. 9, pp. 1347-1354, 2009.
- [7] M. Majumder, T. K. Gangopadhyay, A. K. Chakraborty, K. Dasgupta and D. K. Bhattacharya, "Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, pp. 150-164, 2008.
- [8] A. Othonos and K. Kalli, *Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*: Artech House, 1999.
- [9] B. Peeters, J. Maeck and G. Roeck, "Vibration-based damage detection in civil engineering: excitation sources and temperature effects", *Smart Materials and Structures*, vol. 10, p. 518, 2001.
- [10] P. Antunes, R. Travanca, H. Varum and P. André, "Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers", *Journal of Constructional Steel Research*, 2011 (Submetido).
- [11] Computers and Structures, Inc. (2011). Available: <http://www.csiberkeley.com/sap2000>.

Capítulo 8

Monitorização do comportamento dinâmico de um reservatório de água elevado

8.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é descrito o ensaio dinâmico de um reservatório de água elevado localizado no Campus Universitário da Universidade de Aveiro. A monitorização foi efectuada com recurso ao sensor óptico de aceleração biaxial desenvolvido, baseado em redes de Bragg gravadas em fibra óptica.

Durante o ensaio foram realizadas medidas dinâmicas de aceleração, durante a aplicação de impulsos mecânicos no topo do reservatório, numa localização próxima do ponto de medida, e com a estrutura apenas exposta a acções ambientais. O ensaio permitiu estudar o comportamento dinâmico da estrutura e, simultaneamente, demonstrar a fiabilidade da utilização de sensores ópticos na caracterização e monitorização estrutural. Os valores de frequências próprias transversais e longitudinais obtidos são comparados com resultados de

medidas efectuadas simultaneamente com recurso a um sismógrafo, de modo a validar o funcionamento do sensor implementado.

8.2 DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA ESTUDADA E INSTALAÇÃO DO SENSOR

A estrutura estudada neste capítulo é o reservatório de água do Campus Universitário da Universidade de Aveiro. Esta estrutura, que se mostra na figura 8.1, foi projectada pelo Arquitecto Álvaro Siza Vieira e foi construída entre 1988 e 1989.



Figura 8.1: Reservatório de água da Universidade de Aveiro.

O reservatório em betão armado é constituído por uma lâmina de 30.9 m de altura, com 4 m de largura e 0.3 m de espessura; um elemento de secção tubular circular de diâmetro interior 1.2 m e 0.6 m de espessura, com uma altura de 30.9 m; e por um reservatório de betão armado com a geometria correspondente a um paralelepípedo oco. Como contraventamento, existem aos terços da altura duas barras de aço inoxidável de secção oca com diâmetro externo de 150 mm (espessura de 5 mm), entre a lâmina de betão e a secção tubular. O reservatório apresenta uma altura total de 35.25 m.

Na figura 8.2 a) apresenta-se uma fotografia obtida no topo do reservatório onde se mostra a parte superior do elemento de secção tubular. O sensor óptico foi instalado definitivamente, para medidas futuras, por detrás da escadaria metálica de acesso ao topo do depósito, por meio de quatro buchas metálicas e parafusos em aço inoxidável, como se mostra na figura 8.2 a). Na figura 8.2 b) apresenta-se a peça de fixação do acelerómetro ao reservatório.



Figura 8.2: a) Localização do ponto de medição no reservatório de água e b) peça de fixação utilizada.

Actualmente encontra-se em fase de instalação uma rede de fibra óptica que liga alguns edifícios e estruturas do Campus Universitário da Universidade de Aveiro, entre as quais a ponte pedonal do Crasto, o reservatório de água e o edifício do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Num futuro próximo será possível, em tempo real, monitorizar parâmetros estáticos e dinâmicos destas estruturas a partir dos laboratórios do Departamento de Física, através de uma rede de sensores ópticos a ser instalada. É neste sentido que se enquadra a instalação definitiva do referido acelerómetro biaxial no reservatório.

8.3 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS

Para a obtenção das frequências próprias do reservatório foi utilizado o acelerómetro óptico biaxial baseado em redes de Bragg desenvolvido. O equipamento de monitorização é semelhante ao usado nas torres de radiocomunicações, esquematizado na figura 7.4, e inclui uma fonte óptica com elevada largura espectral, modelo ALS-CL-17-B-FA da *Amonics*, um circulador óptico e um espectrómetro da *Ibsen*, modelo I-MON E, com uma taxa de aquisição de 950 Hz. Como referência foram utilizados os dados obtidos com um sismógrafo, modelo GSR18 da *GeoSig*, que permitiu

validar os dados obtidos com o sensor óptico. Na figura 8.3 mostra-se um esquema em planta do topo do reservatório, com indicação da posição dos sensores utilizados.

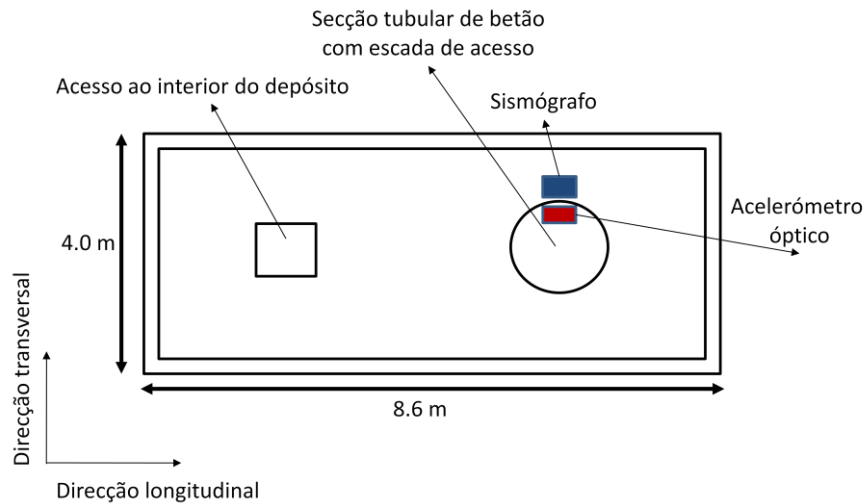


Figura 8.3: Esquema em planta do topo do reservatório e montagem experimental utilizada no registo das acelerações.

Os resultados que se mostram nesta secção foram obtidos em 8 de Setembro de 2011, durante a aplicação de impulsos mecânicos num local próximo à posição dos sensores. No seu topo, o reservatório apresenta um rebordo com cerca de 15 cm de altura, local escolhido para a aplicação dos impulsos horizontais externos com recurso a um martelo. Na figura 8.4 apresenta-se uma fotografia do topo do reservatório com indicação do local de aplicação dos impulsos mecânicos, aplicados neste caso na direcção transversal.



Figura 8.4: Topo do reservatório de água, com indicação da localização do ponto de aplicação dos impulsos externos.

Nas figuras 8.5 e 8.6 são apresentados os dados de aceleração registados ao longo do tempo, medidos com os dois sensores, óptico e sismógrafo, durante 30 segundos.

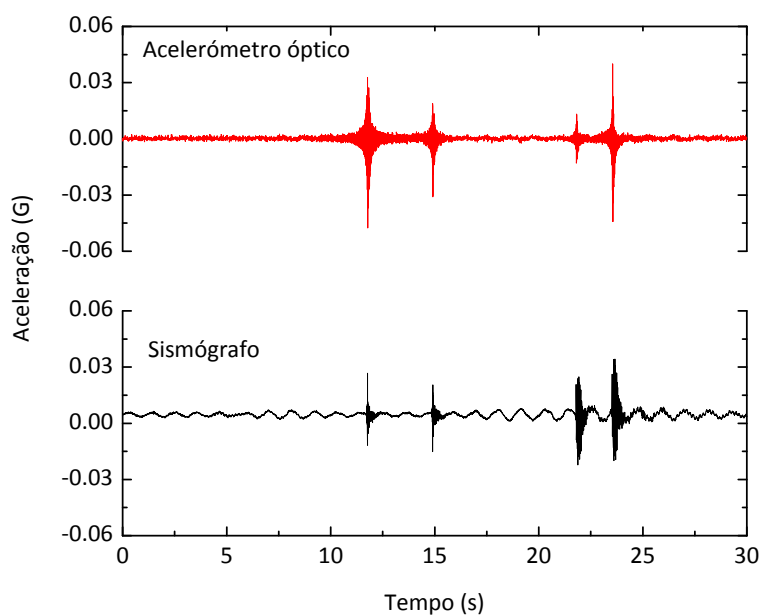


Figura 8.5: Dados registados com o sensor óptico e sismógrafo durante a aplicação de impulsos mecânicos, na direcção transversal.

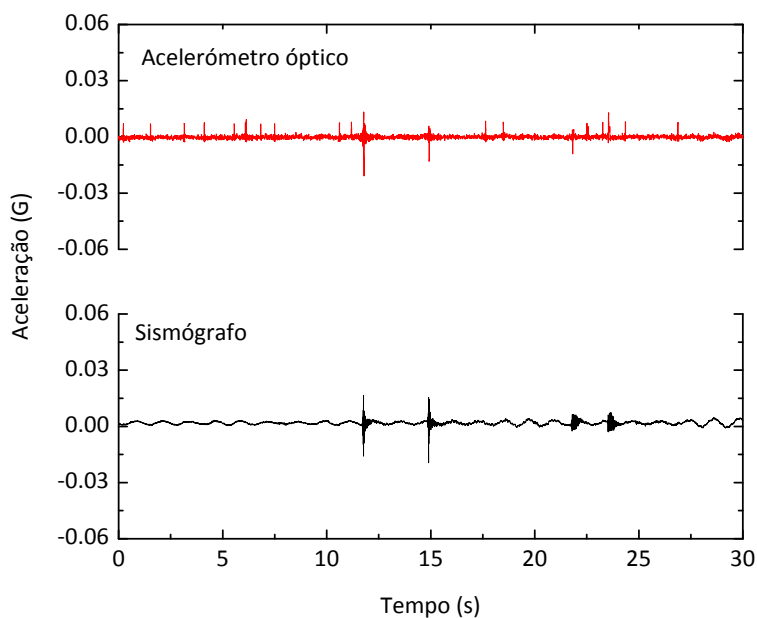


Figura 8.6: Dados registados com o sensor óptico e sismógrafo durante a aplicação de impulsos mecânicos, na direcção longitudinal.

Verifica-se que o sensor óptico detecta os impulsos aplicados, no entanto observam-se diferenças entre os sinais medidos com os dois sensores. As diferenças poderão ser justificadas pelo tipo de apoio/ligação dos sensores à estrutura. O sensor óptico encontra-se rigidamente acoplado à

estrutura enquanto o sismógrafo, apesar do seu peso, se encontra apenas apoiado na estrutura, podendo neste caso existir algum movimento entre a estrutura e o sismógrafo.

As frequências próprias da estrutura são obtidas por *peak-picking* do espectro de frequências, obtido por transformada rápida de Fourier dos dados de aceleração ao longo do tempo. Nas figuras 8.7 e 8.8 mostram-se os espectros de frequências obtidos para os dados de aceleração apresentados nas figuras 8.5 e 8.6.

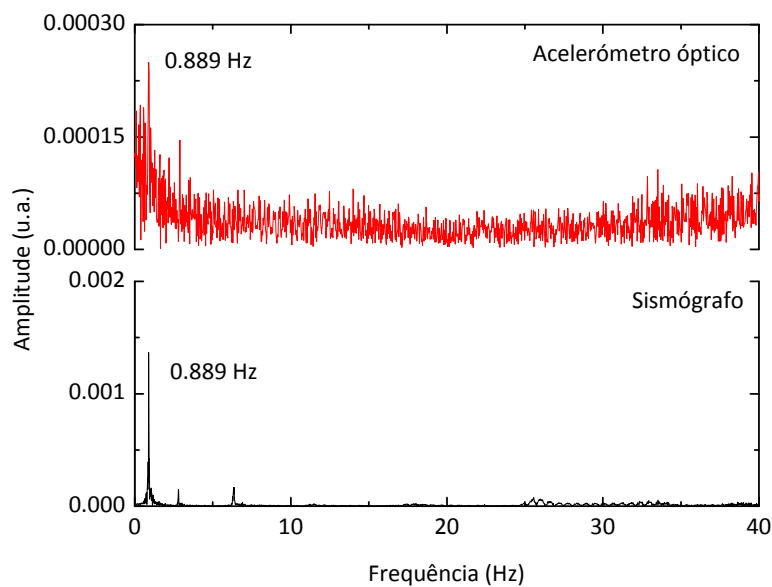


Figura 8.7: Espectros de frequências dos dados de aceleração registados na direcção transversal.

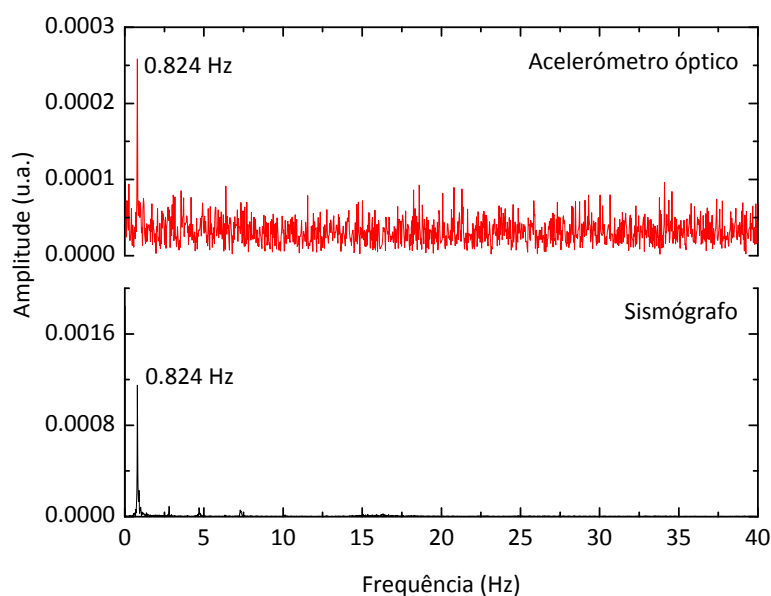


Figura 8.8: Espectros de frequências dos dados de aceleração registados na direcção longitudinal.

Contrariamente ao que seria de esperar, dado que os impulsos foram aplicados na direcção transversal, pela análise aos espectros de frequências das figuras 8.7 e 8.8 verifica-se que o nível de ruído é menor na direcção longitudinal, o que permite uma identificação mais rigorosa da frequência própria nesta direcção.

Na tabela 8.1 apresentam-se resumidos os valores da primeira frequência própria do reservatório nas duas direcções sensíveis e a diferença relativa entre os valores obtidos com o sensor óptico e o sismógrafo.

Modo	Frequência (Hz)					
	Acelerómetro Óptico		Sismógrafo		Diferença relativa (%)	
	Direcção Transversal	Direcção Longitudinal	Direcção Transversal	Direcção Longitudinal	Direcção Transversal	Direcção Longitudinal
1	0.889	0.824	0.889	0.824	< 0.05	< 0.06

Tabela 8.1: Frequências próprias determinadas a partir dos dados de aceleração registados em Setembro de 2011.

Verifica-se que existe uma diferença máxima inferior a 0.06 % na obtenção das frequências próprias da estrutura com o acelerómetro óptico, relativamente ao valor das frequências próprias obtidas com recurso às medições com o sismógrafo.

8.4 DETERMINAÇÃO DAS FREQUÊNCIAS PRÓPRIAS COM EXCITAÇÃO AMBIENTE

Com o sensor óptico localizado na posição indicada na figura 8.4, registou-se a resposta unicamente para a acção do vento. Este tipo de excitação ambiente permite a monitorização remota e a obtenção do valor das frequências próprias sem necessidade de recursos humanos para aplicação de impulsos externos no local de medida.

Na figura 8.9 mostra-se a resposta da estrutura à acção do vento, em termos de acelerações, respectivamente para as direcções transversal e longitudinal.

Na figura 8.10 são apresentados os espectros de frequências, obtidos por transformada rápida de Fourier, dos dados de aceleração longitudinal ao longo do tempo, mostrados na figura 8.9.

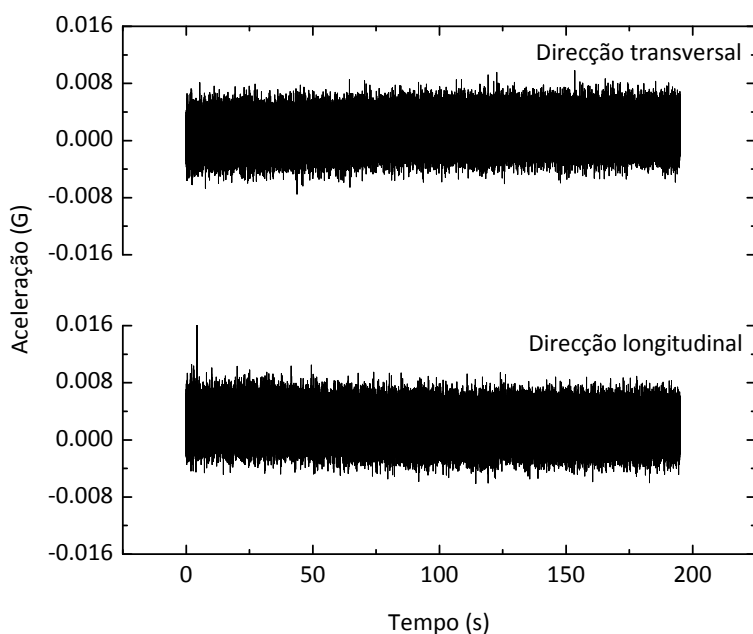


Figura 8.9: Aceleração medida com o acelerómetro óptico no reservatório sob acção do vento, nas direcções transversal e longitudinal.

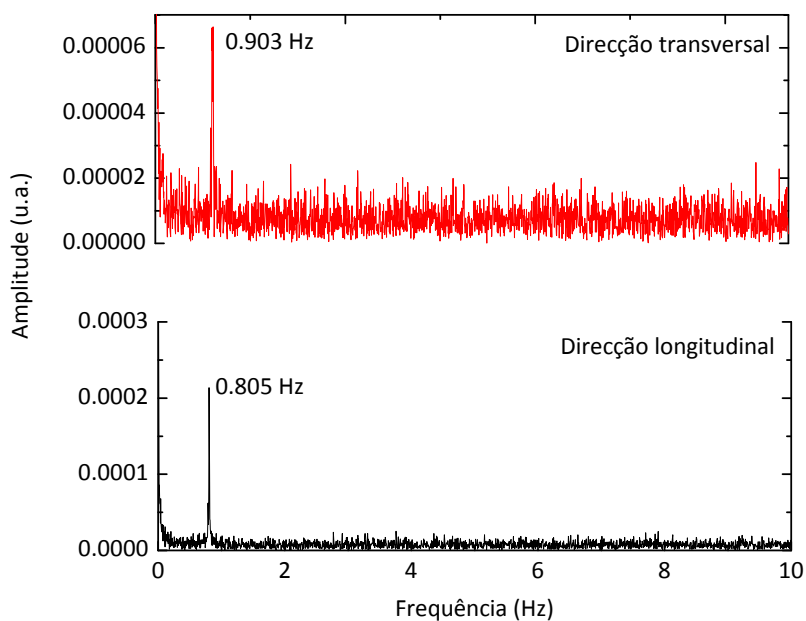


Figura 8.10: Espectros de frequências dos dados de aceleração registados com o sensor óptico.

Pela análise da figura 8.10 verifica-se que é possível a monitorização das frequências próprias da estrutura com o sensor implementado apenas com a acção do vento. Este tipo de monitorização possibilita a inclusão do sensor em esquemas de monitorização remota. Obteve-se um valor de 0.903 Hz para a primeira frequência própria na direcção transversal e de 0.805 Hz para a direcção

longitudinal. Estes valores são consistentes com os valores encontrados por meio de excitação externa.

8.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os resultados de medidas de aceleração longitudinal e transversal, com um sensor óptico e um sismógrafo, com o intuito de determinar as frequências próprias da estrutura e comprovar a aplicabilidade da utilização de sensores ópticos na monitorização dinâmica deste tipo de estruturas. Através de medidas realizadas com o sensor óptico implementado foi possível identificar a frequência própria transversal e longitudinal da estrutura com um erro relativo máximo de 0.06 %, relativamente aos valores obtidos com recurso a um sismógrafo comercial.

Capítulo 9

Sensor de humidade relativa

9.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é proposto um sensor de humidade relativa baseado numa rede de Bragg gravada em fibra óptica, associada a um revestimento de um material híbrido orgânico-inorgânico preparado pelo método de *sol-gel*. Este tipo de sensor toma partido das principais vantagens da tecnologia óptica em relação às soluções electrónicas tradicionais.

A utilização de um material híbrido orgânico-inorgânico confere propriedades adicionais vantajosas ao sensor óptico, como a facilidade e o baixo custo de processamento e interacção melhorada com a fibra óptica devido à presença de um esqueleto inorgânico à base de sílica. Este tipo de propriedades providencia maior sensibilidade e eficiência ao processo de transdução.

Nesta secção é ainda apresentada uma aplicação do sensor desenvolvido baseada na monitorização de dois blocos de betão expostos às condições ambientais.

9.2 ESTADO ACTUAL DA TECNOLOGIA

A humidade relativa (HR) do ar é definida como a razão entre a quantidade de vapor de água presente na atmosfera e a quantidade máxima que a atmosfera pode conter. Existem vários métodos para detectar esse parâmetro, incluindo sensores resistivos, capacitivos e higrométricos. Em relação à tecnologia de fibra óptica, uma vez que a fibra óptica não revestida é imune a variações de HR, é necessário revestir a fibra com um material sensível à humidade. Este material irá funcionar como transdutor para converter a variação de HR numa perturbação mecânica.

A influência da HR sobre uma FBG revestida com um polímero foi primeiramente descrita por Giaccari *et al.* [1]. O princípio de detecção baseia-se na deformação induzida na rede de Bragg resultante da expansão do material absorvente de água. Com este sensor e com um revestimento de poliamida, os autores obtiveram uma resposta linear ao longo de uma vasta gama de valores de HR, de 10 % a 90 %. Devido à sensibilidade térmica da FBG, é necessário um regime suplementar para compensar os efeitos da variação térmica ambiente. Esta situação pode ser facilmente resolvida através da utilização adicional de uma rede de Bragg simples, não revestida, logo insensível a variações de HR.

A investigação desenvolvida neste domínio inclui o estudo da influência da espessura do revestimento em várias características de detecção, incluindo a sensibilidade à HR e à temperatura, o tempo de resposta e os efeitos da histerese. Yeo *et al.* concluíram que a sensibilidade do sensor de HR pode ser melhorada com o uso de uma camada mais espessa de polímero de detecção, induzindo um efeito de maior deformação sobre a rede de Bragg [2]. No entanto, neste caso, a resposta do sensor é mais lenta e aumenta a sensibilidade a variações de temperatura ambiente. Um pequeno grau de histerese foi observado em todos os casos testados.

Em 2009, Venugopalan *et al.* desenharam um sensor de HR baseado numa FBG, adequado para SHM [3]. O princípio de detecção é semelhante ao apresentado em [2], no entanto, o sensor foi inserido num tubo de aço inoxidável contendo vários furos, permitindo o contacto com o meio ambiente. Para compensar o efeito térmico sobre o sensor de humidade, foi também incluída no tubo uma FBG não revestida. Esta configuração proporciona ao sensor a resistência mecânica adequada, essencial para resistir a condições adversas típicas de trabalho de monitorização estrutural. Além disso, o efeito da sensibilidade térmica cruzada é também solucionado. Em 2008, o mesmo grupo de investigação já havia proposto um sensor de humidade com a mesma finalidade, baseado numa rede de período longo [4]. A rede foi revestida com polímero de álcool

polivinílico (PVA), devido à sua afinidade com a água e à facilidade de revestimento da fibra. O princípio de detecção baseia-se na variação do índice de refração do PVA e, consequentemente, do comprimento de onda, como resultado do efeito físico de expansão da rede.

Neste âmbito, o sensor óptico proposto apresenta-se como uma ferramenta de baixo custo e de baixa complexidade, que permite medir humidade relativa, podendo ser utilizado na monitorização de estruturas, nomeadamente para o registo do nível de humidade relativa em pontos próximos da armadura de aço das estruturas de engenharia civil, onde altos níveis de HR podem acelerar o processo de corrosão. Poderá ainda ser utilizado na avaliação do seu estado de conservação global, permitindo identificar a localização e extensão de eventuais danos ocorridos. A solução proposta tem aplicação na monitorização de estruturas de engenharia civil (edifícios, pontes, barragens, monumentos, etc.), principalmente em estruturas de elevada envergadura, onde a capacidade de multiplexagem se torna uma vantagem. Apesar da propriedade de expansão devido à absorção de água ser comum a polímeros orgânicos (por exemplo polimetilmetacrilato, PMMA), no caso de ureasils, a presença de SiO_2 na composição do híbrido aumenta a interacção desse material com a fibra óptica de sílica. Assim, o processo de transdução é mais eficiente, reflectindo-se no aumento da sensibilidade e durabilidade do elemento sensor.

9.3 DESCRIÇÃO DO SENSOR IMPLEMENTADO

O sensor proposto baseia-se numa fibra óptica com uma rede de Bragg inscrita. A rede é revestida com material híbrido orgânico-inorgânico denominado di-ureasil cujo comprimento de cadeia polimérica é variável, que funciona como transdutor no processo, dilatando volumetricamente ao absorver humidade do ar [5]. Na figura 9.1 mostra-se um esquema do sensor de humidade desenvolvido.

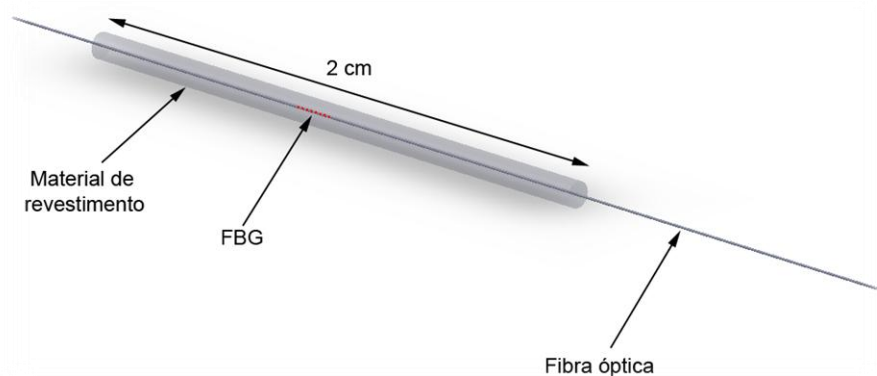


Figura 9.1: Esquematização do sensor de humidade relativa proposto.

O material é depositado através do método de *dip-coating*, sendo a fibra com a FBG imersa no material de revestimento em fase líquida. Este processo foi repetido de modo a formar uma camada mais espessa de material. O processo de secagem foi realizado numa estufa durante cerca de 72 horas.

Na figura 9.2 mostra-se uma fotografia do sensor, sendo visível a fibra óptica com o revestimento do material transdutor.



Figura 9.2: Sensor antes de encapsulado, com o material de revestimento sobre a região onde se encontra inscrita a rede de Bragg.

A implementação do sensor de humidade pode ser realizada recorrendo a fibras ópticas de sílica ou poliméricas, onde seja possível a inscrição de redes Bragg.

O material de revestimento utilizado apresenta uma forte adesão à fibra óptica e é significativamente afectado pela alteração de humidade, possibilitando uma sensibilidade incrementada devido à presença de uma componente inorgânica à base de silício. Com o aumento da humidade ambiente o material expande e, devido à forte adesão à fibra óptica, provoca um alongamento da rede de Bragg. Esta perturbação induz um deslocamento do espectro reflectido pela rede de Bragg, que pode ser aferido recorrendo a um sistema interrogador.

Para proteger a fibra óptica o sensor é inserido num tubo metálico de 15 cm de comprimento e 2 mm de diâmetro interior, tal como apresentado na figura 9.3. O tubo metálico foi furado na região da fibra óptica revestida, de modo a permitir que o material sensível esteja exposto à humidade relativa ambiente.

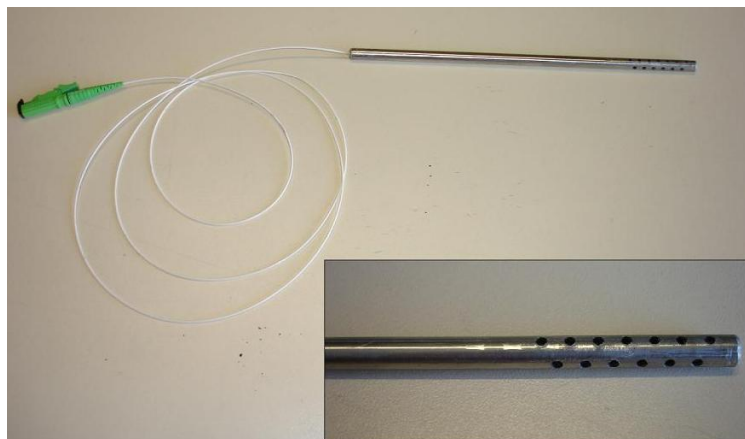


Figura 9.3: Protótipo do sensor óptico de humidade relativa implementado, inserido num tubo de protecção.

9.4 CARACTERIZAÇÃO DO SENSOR IMPLEMENTADO

Com o intuito de mostrar a aplicabilidade do sensor foram monitorizados dois blocos de betão, expostos às condições climáticas ambientais. Para isso, foram desenvolvidos dois sensores seguindo o procedimento descrito anteriormente.

Para calibração e teste dos sensores de humidade relativa utilizou-se uma câmara térmica, modelo Challenge 340 da *Angelantoni Industrie*. Os sensores foram colocados no interior deste equipamento e sujeitos a um ciclo de variações de temperatura e humidade relativa, que se mostra na figura 9.4, de modo a obter a sua sensibilidade térmica e sensibilidade à humidade relativa.

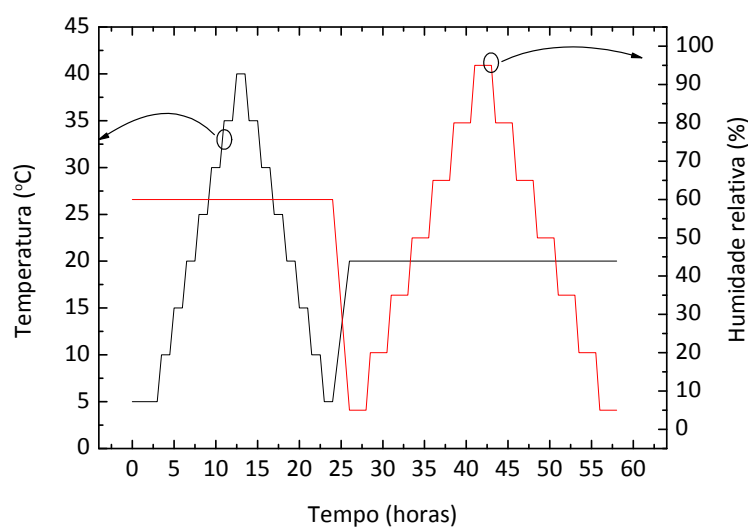


Figura 9.4: Evolução temporal das condições impostas de temperatura e humidade relativa no interior da câmara térmica de caracterização.

A resposta dos sensores às condições impostas é apresentada nas figuras 9.5 e 9.6, de onde se podem obter as sensibilidades à temperatura e à humidade relativa. Os sensores implementados serão identificados por Sensor A e Sensor B.

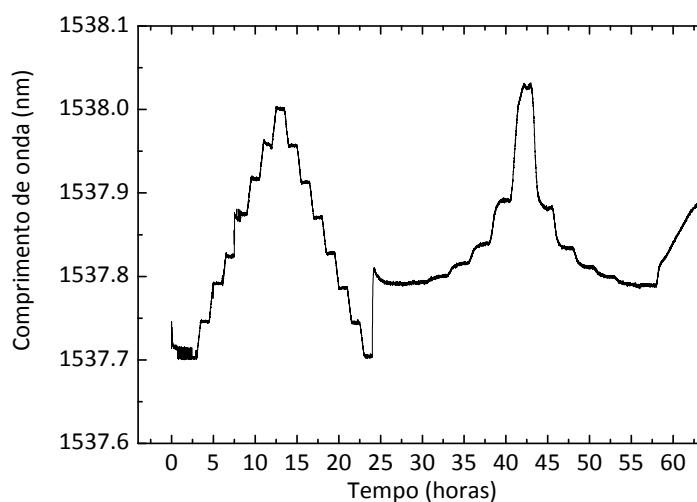


Figura 9.5: Resposta do sensor de humidade relativa, designado por Sensor A, às condições impostas no interior da câmara térmica.

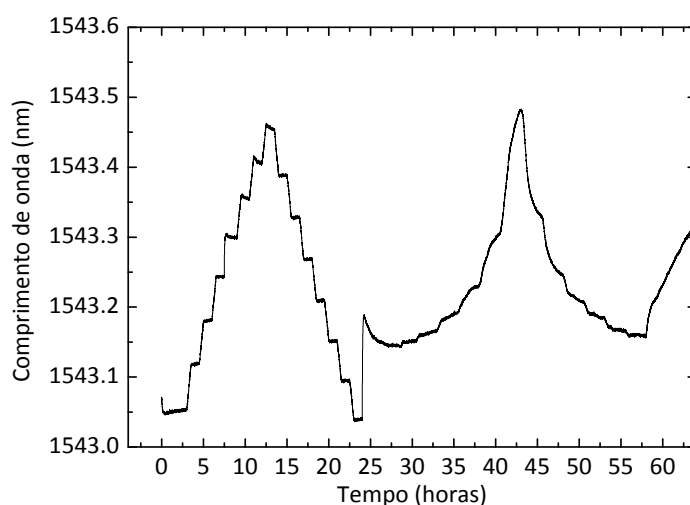


Figura 9.6: Resposta do sensor de humidade relativa, designado por Sensor B, às condições impostas no interior da câmara térmica.

A sensibilidade à temperatura é obtida por ajuste linear aos dados de comprimento de onda em função da temperatura a que os sensores estão expostos. Nas figuras 9.7 e 9.8 mostra-se a variação do comprimento de onda em função da temperatura e os ajustes lineares de que resulta a sensibilidade, para cada um dos sensores implementados.

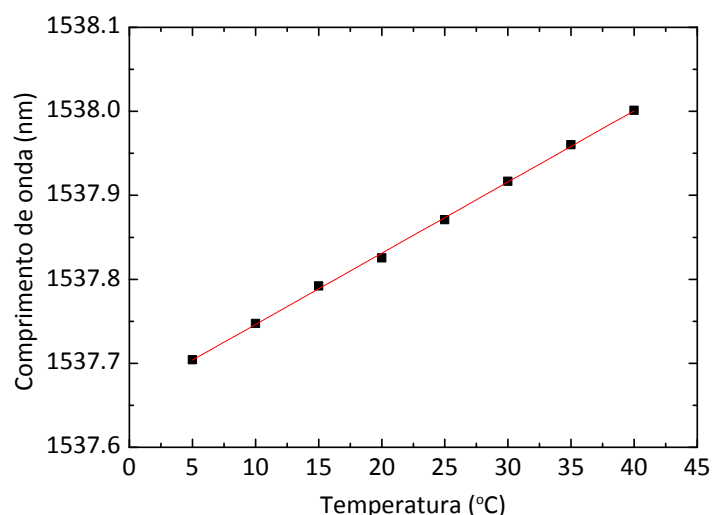


Figura 9.7: Comprimento de onda do sensor A para vários valores de temperatura impostos na câmara térmica e ajuste linear ($R^2 = 0.9992$). Os pontos representam os dados experimentais, e a linha o ajuste linear.

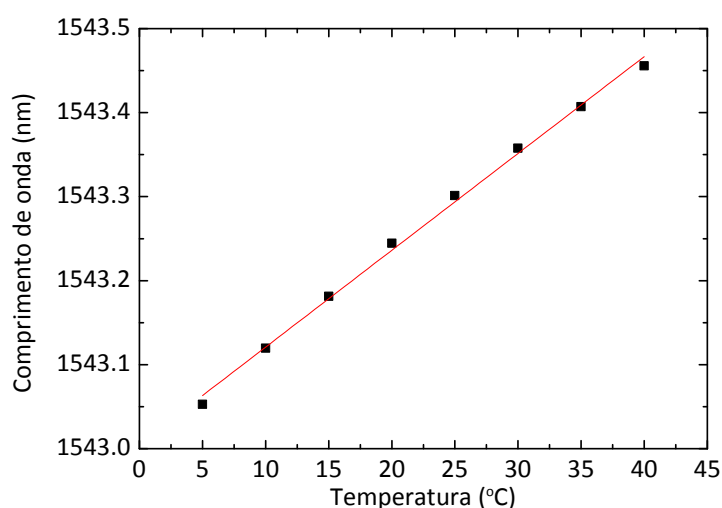


Figura 9.8: Comprimento de onda do sensor B para vários valores de temperatura impostos na câmara térmica e ajuste linear ($R^2 = 0.9966$). Os pontos representam os dados experimentais, e a linha o ajuste linear.

Dos dados das figuras 9.7 e 9.8 obtém-se a sensibilidade térmica dos sensores. Neste caso foram de 8.48 ± 0.09 pm/°C e de 11.5 ± 0.25 pm/°C, respectivamente para os sensores A e B. Estes valores devem ser tidos em consideração no cálculo da resposta à humidade relativa.

Dado que a resposta em comprimento de onda de Bragg do sensor em função da humidade relativa ambiente não é linear, ajustaram-se os dados de resposta a uma função de crescimento que melhor representasse este comportamento. Escolheu-se a função sigmoidal de Richards, tipo 1, dada por:

$$HR = \begin{cases} \left[a^{1-d} - e^{-k(\lambda_B - \lambda_0)} \right]^{1/(1-d)}, & d < 1 \\ \left[a^{1-d} + e^{-k(\lambda_B - \lambda_0)} \right]^{1/(1-d)}, & d > 1 \end{cases} \quad (9.1)$$

onde a , d , k e λ_0 são parâmetros de ajuste. O resultado dos ajustes numéricos são apresentados nas figuras 9.9 e 9.10, nas quais se representa o comprimento de onda de Bragg em função da humidade relativa. Embora o ensaio tenha sido realizado a uma temperatura de 20 °C, os ajustes foram realizados para uma temperatura de 0 °C. Do ajuste resultam os parâmetros registados na tabela 9.1.

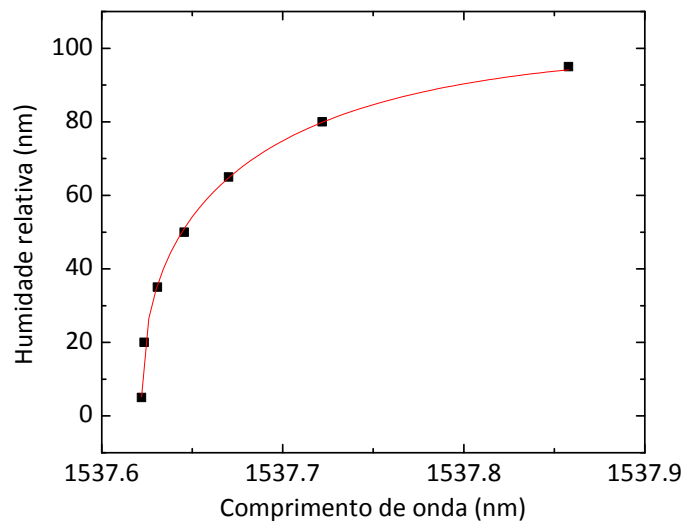


Figura 9.9: Comprimento de onda do sensor A para vários valores de humidade relativa, para uma temperatura de 0 °C e ajuste à função de Richards do tipo 1 ($R^2 = 0.99867$). Os pontos representam os dados experimentais e a linha o ajuste.

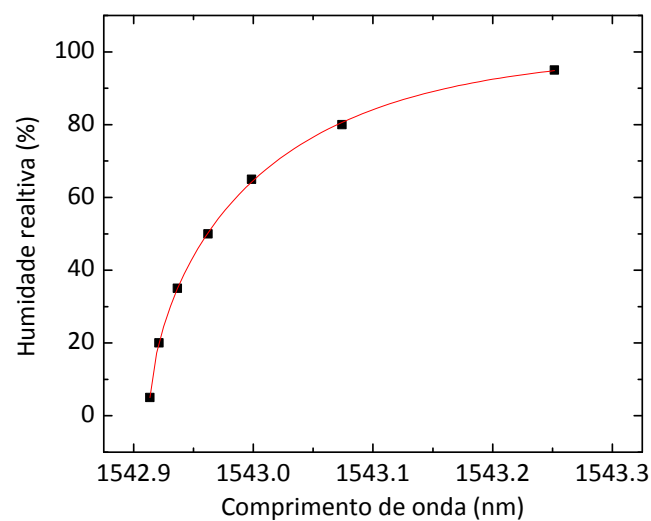


Figura 9.10: Comprimento de onda do sensor B para vários valores de humidade relativa, para uma temperatura de 0 °C e ajuste à função de Richards do tipo 1 ($R^2 = 0.99965$). Os pontos representam os dados experimentais e a linha o ajuste.

Coeficiente de ajuste	Sensor A	Sensor B
a (%)	100	100
λ_0 (nm)	1539.059±0.141	1544.057±0.053
d	-1.571±0.095	-0.770±0.037
k (nm ⁻¹)	8.239±0.523	7.119±0.187

Tabela 9.1: Coeficientes de ajuste à expressão de Richards, para os dois sensores desenvolvidos.

Dado que o coeficiente de controlo d é inferior a 1, da expressão (9.1) resulta a expressão de calibração que relaciona a resposta do sensor em função do comprimento de onda de Bragg, λ_B , afectado pela variação da humidade relativa ao seu redor. A expressão (9.1) é válida para uma temperatura, T , de 0 °C. Para outros valores de temperatura é necessária uma correcção efectiva da expressão. Como a sensibilidade à temperatura, S_T , foi calculada anteriormente para cada sensor, obtendo-se 8.48 ± 0.09 pm/°C e 11.5 ± 0.25 pm/°C, respectivamente para os sensores A e B, as expressões finais (9.2) de calibração para o sensor A, HR_A , e para o sensor B, HR_B , são:

$$HR_A = \left[100^{2.571} - e^{-8.239(\lambda_B - (1539.059 - 0.00848T))} \right]^{0.389} \quad (9.2)$$

$$HR_B = \left[100^{1.770} - e^{-7.119(\lambda_B - (1544.057 - 0.0115T))} \right]^{0.565}$$

As expressões de calibração apresentadas dependem apenas do comprimento de onda de Bragg (em nm) e da temperatura a que o sensor está exposto (em °C).

A variação do comprimento de onda reflectido pela rede de Bragg do sensor não é linear com a variação da humidade relativa ambiente. Neste caso a resolução do sensor dependerá do nível de humidade relativa e da resolução do equipamento de medida do comprimento de onda de Bragg. Verifica-se que para níveis de humidade relativa mais elevados a variação do comprimento de onda de Bragg é maior, pelo que a resolução do sensor será superior. No entanto, a maior fonte de erro, e que degrada a resolução, é a resolução do equipamento de medida, que neste caso é de 10 pm (interrogador modelo sm125 da *Micron Optics*). Na figura 9.11 apresenta-se o valor previsto da resolução do sensor de humidade relativa A em função do valor de humidade relativa a que o sensor está exposto, utilizado um equipamento de medida da variação do comprimento de onda com uma resolução de 10 pm e comparando com a resolução obtida com um equipamento de medida com uma resolução de 1 pm, já existente no mercado.

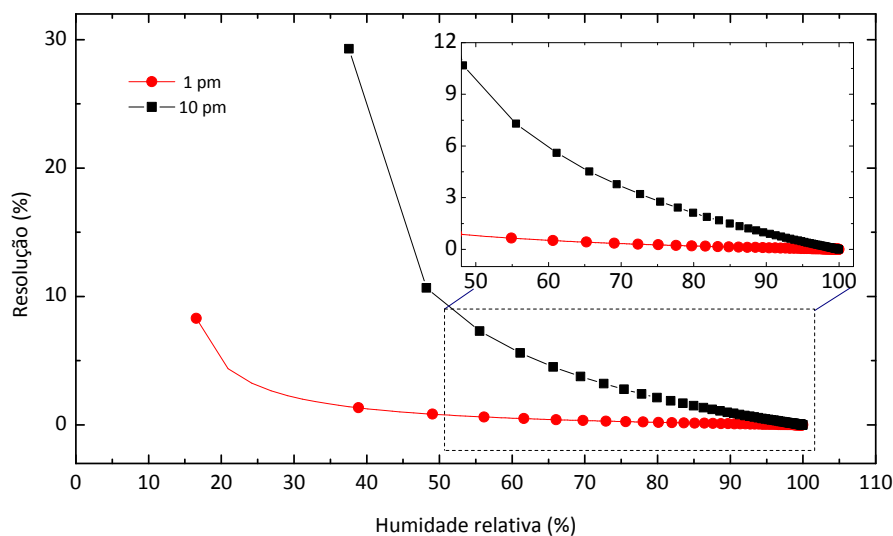


Figura 9.11: Resolução do sensor A em função do nível de humidade relativa ambiente.

De acordo com os resultados anteriores, verifica-se que utilizando um interrogador com uma resolução de 1 μm se obtém um erro inferior a 1 %, para medidas de humidade relativa acima de 50 %.

Dada a dependência com a temperatura das medidas realizadas com os sensores, construiu-se um sensor de temperatura que permitirá compensar esse efeito. O sensor é também baseado numa rede de Bragg, permitindo assim a sua multiplexação com os sensores de humidade relativa desenvolvidos. A rede de Bragg, sem revestimento, é colocada no interior de uma dupla agulha hipodérmica, de modo a proteger a fibra do contacto físico com o exterior, e simultaneamente permitir que esta se deforme com as variações de temperatura. Na figura 9.12 mostra-se as duas agulhas e a fibra com a rede de Bragg, que formam o sensor de temperatura.

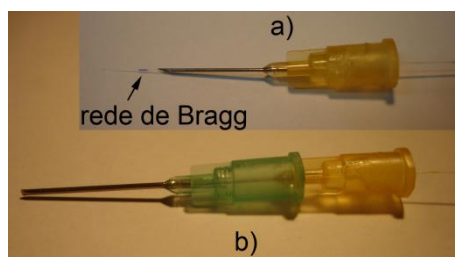


Figura 9.12: Sensor de temperatura utilizado:
a) agulha interior e b) agulha exterior.

Antes do sensor de temperatura ser utilizado procedeu-se à sua caracterização, de modo a obter a sua sensibilidade. A caracterização foi realizada com recurso a uma câmara térmica, modelo

Challenge 340 da *Angelantoni Industrie*. A resposta do sensor à variação de temperatura é apresentada na figura 9.13.

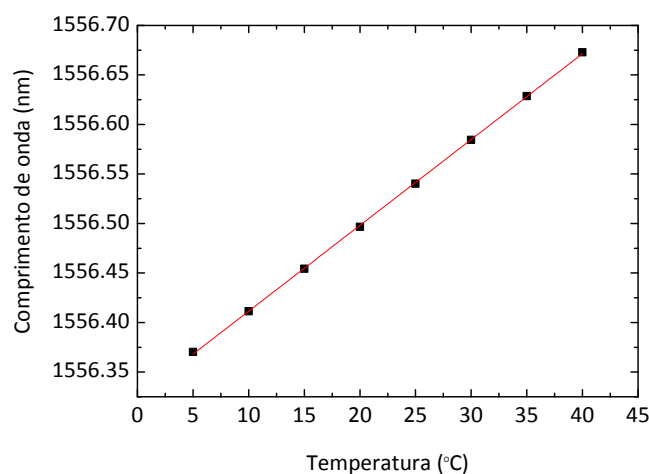


Figura 9.13: Resposta do sensor de temperatura utilizado.
Os pontos representam os dados experimentais e a linha o ajuste linear ($R^2 = 0.99983$).

Dos dados da figura 9.13 foi possível obter, por ajuste linear, a sensibilidade à temperatura do sensor, obtendo-se um valor de 8.67 ± 0.04 pm/°C.

O sensor de temperatura foi utilizado em simultâneo com os sensores de humidade relativa implementados, de modo a permitir a compensação de variações de temperatura na resposta dos sensores.

9.5 APLICAÇÃO DO SENSOR IMPLEMENTADO

Actualmente, existem dois protótipos de sensor de humidade relativa instalados em dois blocos cúbicos de betão, com dimensões 25 x 25 x 25 cm, expostos às condições atmosféricas no terraço do edifício do Departamento de Física da Universidade de Aveiro. Esta localização é apropriada pois permite que os blocos de betão estejam expostos às condições atmosféricas e, por outro lado, torna possível utilizar os dados de temperatura e humidade relativa locais registados na torre meteorológica existente no local [6]. Os dados de comprimento de onda das redes de Bragg são recolhidos periodicamente, bem como os dados de temperatura e de humidade relativa ambiente. De modo a compensar os efeitos da variação de temperatura na resposta dos sensores de humidade, foi colocado num dos blocos de betão, o sensor de temperatura implementado e descrito anteriormente. Junto aos blocos de betão encontra-se um acoplador óptico 1 x 3, que

multiplexa o sinal dos três sensores para uma única fibra óptica. Esta fibra óptica liga os modelos no terraço do edifício ao laboratório de Óptica e Optoelectrónica do Departamento de Física da Universidade de Aveiro, no qual são realizadas as medidas. Na figura 9.14 é apresentado o espectro óptico do sinal reflectido dos três sensores, obtido numa das medidas efectuadas.

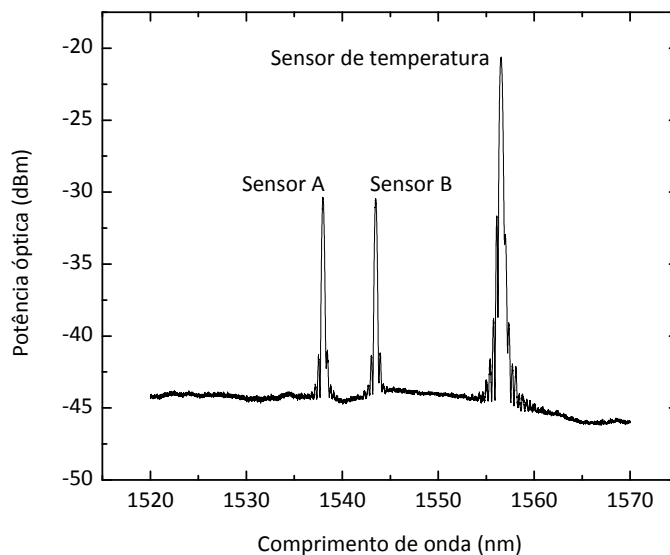


Figura 9.14: Espectro óptico com os dois sensores de humidade relativa e o sensor de temperatura multiplexados.

Na figura 9.15 mostram-se os dois blocos de betão ensaiados. Os blocos diferem na sua constituição; um dos blocos representa um betão mais poroso e, por isso, deverá ser mais afectado pelas variações de humidade relativa exterior. Os sensores foram inseridos em orifícios realizados no bloco de modo a que a parte sensora (rede de Bragg) ficasse alojada aproximadamente no centro do bloco, sendo depois os orifícios selados com resina do tipo *epoxy*.

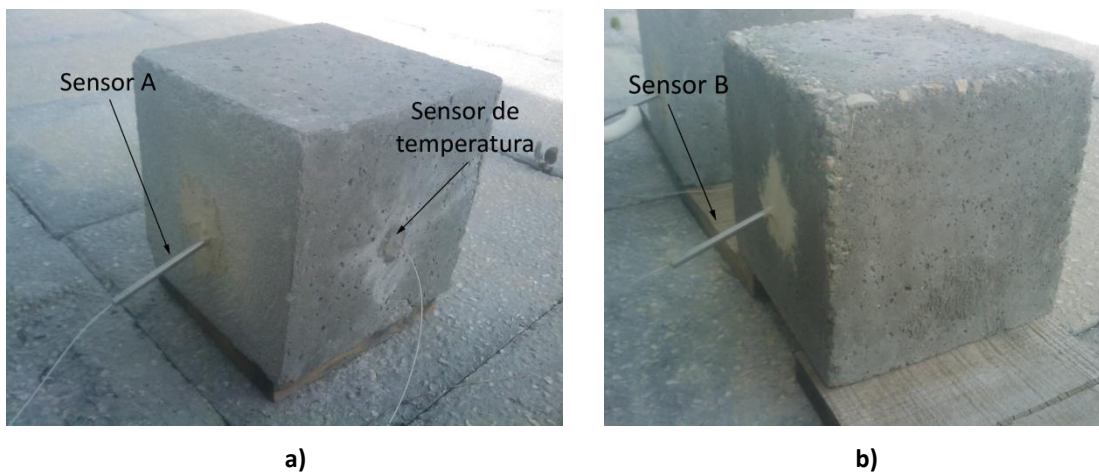


Figura 9.15: Blocos de betão ensaiados. a) Bloco de betão com sensor A e sensor de temperatura e b) bloco de betão com sensor B.

Na figura 9.16 mostram-se os resultados de variação de humidade relativa ao longo do tempo (ensaio ainda em execução), utilizando os dois sensores desenvolvidos. Na mesma figura está também representada a humidade relativa ambiente, no entanto, tal como esperado, o valor da humidade é bastante mais estável no interior dos blocos de betão do que no exterior.

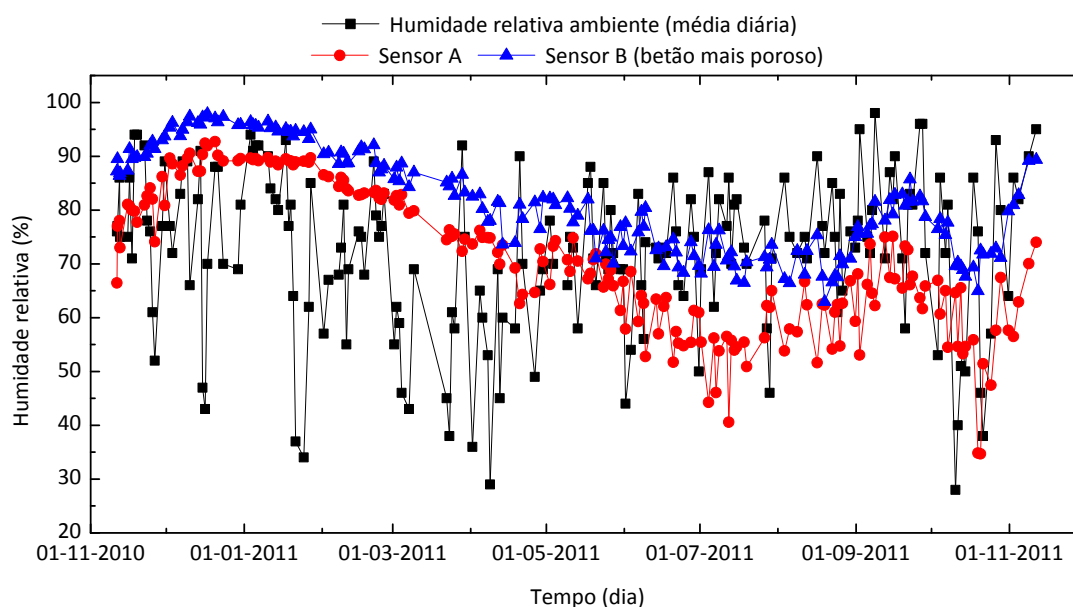


Figura 9.16: Resultados da variação de humidade relativa ao longo do tempo registados com os dois sensores e valores de humidade relativa ambiente.

Pelos dados de caracterização e pelo ensaio em curso, verifica-se que o sensor de humidade relativa apresenta um funcionamento adequado para as aplicações pretendidas. Observa-se um valor máximo da humidade relativa nos meses de Dezembro e Janeiro e um mínimo em Agosto, tal como seria de esperar.

9.6 CONCLUSÕES

Nesta secção descreveu-se o desenvolvimento de um sensor de humidade relativa baseado em redes de Bragg. O sensor foi caracterizado e testado em condições reais, verificando-se o seu correcto funcionamento e viabilidade de emprego em estruturas de engenharia civil. O sensor tem aplicabilidade directa na caracterização da integridade de estruturas de engenharia civil, nomeadamente em estruturas de elevada envergadura onde a capacidade de multiplexagem se torna uma vantagem, ou em estruturas onde o uso de sensores totalmente ópticos apresenta vantagens reais, tais como perfurações petrolíferas, centrais nucleares ou barragens hidroeléctricas.

9.7 REFERÊNCIAS

- [1] H. Limberger, P. Giaccari and P. Kronenberg, "Influence of humidity and temperature on polyimide-coated fiber Bragg gratings", Bragg Gratings, Photosensitivity, and Poling in Glass Waveguides (BGPP), Stresa, Italy, 4 de Julho, 2001.
- [2] T. L. Yeo, T. Sun, K. T. V. Grattan, D. Parry, R. Lade and B. D. Powell, "Characterisation of a polymer-coated fibre Bragg grating sensor for relative humidity sensing", *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 110, pp. 148-156, 2005.
- [3] T. Venugopalan, T. L. Yeo, F. Basedau, A. S. Henke, T. Sun, K. T. V. Grattan and W. Habel, "Evaluation and calibration of FBG-based relative humidity sensor designed for structural health monitoring", *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, Edinburgh, United Kingdom, 5 Outubro, 2009.
- [4] T. Venugopalan, T. Sun and K. T. V. Grattan, "Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 148, pp. 57-62, 2008.
- [5] P. André, H. Varum, P. Antunes, E. Pecoraro, M. R. André and L. D. Carlos, "Sensor óptico baseado em redes de difracção para monitorização do nível de humidade relativa e temperatura em estruturas de engenharia civil", 2011 (Patente Nacional Pendente).
- [6] Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM)
Available: http://climetua.fis.ua.pt/legacy/main/current_monitor/cesamet.htm

Capítulo 10

Conclusões e trabalho futuro

10.1 CONCLUSÕES

Nesta tese, estruturada em dez capítulos, apresentaram-se os principais aspectos relacionados com sensores ópticos baseados em redes de Bragg gravadas em fibra óptica e a monitorização estrutural. Era objectivo principal o desenvolvimento de sensores ópticos de aceleração para monitorização estrutural. No que respeita ao trabalho teórico, procurou-se desenvolver modelos baseados em elementos finitos que previssem o comportamento dos sensores que seriam implementados, de modo a otimizar as suas características, reduzir custos de produção e economizar tempo. Os resultados dos modelos teóricos foram comparados com os resultados de caracterização experimental, sendo concordantes, pelo que se considera este tipo de simulação essencial na concepção, desenvolvimento e planeamento de novos sensores com redução de custos.

No segundo capítulo foram apresentados os fundamentos das redes de Bragg gravadas em fibra óptica que permitem a sua inclusão em sensores estáticos e dinâmicos para monitorização estrutural. A caracterização de uma rede de Bragg a perturbações externas, nomeadamente a

variações de temperatura e deformação, permitiu obter a sensibilidade da rede. Obtiveram-se valores de $8.93 \pm 0.08 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ e de $1.26 \pm 0.01 \text{ pm}/\mu\epsilon$, respectivamente para a sensibilidade à temperatura e deformação.

No terceiro capítulo foram descritos os objectivos da monitorização estrutural e as suas vantagens, servindo de suporte para verificar as necessidades deste tipo de sistemas. Com este capítulo pretendeu-se rever os fundamentos da monitorização estrutural, os seus objectivos e parâmetros que devem ser monitorizados, fornecendo alguns exemplos de sistemas de monitorização já implementados, de modo a que se pudesse analisar as vantagens da utilização de sensores ópticos na monitorização.

No quarto capítulo foram implementados os sensores de aceleração baseados em tecnologia óptica. Desenvolveram-se dois acelerómetros uniaxiais e um biaxial baseados em redes de Bragg. Os sensores foram projectados com uma ferramenta de elementos finitos que permitiu prever com rigor as frequências naturais dos sensores e optimizar as suas dimensões, reduzindo o tempo e custo de implementação. A modelização em elementos finitos foi testada com sucesso utilizando para isso um acelerómetro caracterizado (acelerómetro modelo V1). Desenvolveu-se um acelerómetro uniaxial com uma frequência própria de 137.39 Hz (acelerómetro modelo V2) que faz uso de um processo de interrogação que em conjunto com o sensor origina uma sensibilidade de 0.997 V/G. A mesma sensibilidade foi obtida para o segundo sensor uniaxial implementado (acelerómetro modelo V3), sendo que neste caso o sistema de interrogação utiliza as redes de Bragg do próprio sensor, obtendo-se uma frequência de ressonância de 346.5 Hz. No caso do sensor óptico biaxial implementado, obtiveram-se sensibilidades de 87.848 pm/G e de 92.351 pm/G, para as duas direcções sensíveis independentes. A frequência própria deste sensor é de cerca de 846 Hz. O sensor de aceleração é insensível a variações de temperatura, podendo ser também utilizado como inclinómetro. Obteve-se uma sensibilidade angular de 1.4 pm.grau^{-1} . Pelas suas características, os sensores implementados poderão ser incluídos em redes de sensores multiplexados baseados em redes de Bragg, para monitorização de estruturas.

No quinto capítulo descreveram-se os resultados da monitorização estática e dinâmica de um ensaio destrutivo realizado numa parede de abobe à escala real. A parede foi monitorizada com uma rede de treze sensores estáticos multiplexados e um acelerómetro óptico. Foram ainda utilizados, nas medidas dinâmicas, um acelerómetro electrónico e um sismógrafo de modo a

validar os dados do sensor óptico. O sensor óptico dinâmico permitiu obter a primeira frequência própria da parede com um erro relativo máximo de 2.08 %. Quanto ao comportamento da estrutura, observa-se uma diminuição de 31.96 % no valor da primeira frequência própria, entre a situação inicial (sem danos) e no final do ensaio cíclico (estrutura danificada), sendo este um resultado esperado uma vez que a perda de rigidez associada aos danos implica uma diminuição na frequência própria. Quando surgem as fissuras principais na parede, estas são registadas pelas medidas estáticas, sendo observado um decréscimo mais significativo do valor da primeira frequência própria. Os resultados apresentados mostraram que redes de sensores ópticos podem ser usadas como ferramentas para SHM de sistemas estruturais complexos, tal como as construções em adobe.

No sexto capítulo foi descrita a monitorização dinâmica de uma ponte pedonal. As frequências próprias, verticais, longitudinais e transversais foram obtidas com um erro máximo de 5.7 %, relativamente aos sensores electrónicos de referência. A evolução dos valores das frequências próprias em medidas realizadas desde 2007 até 2011 indica não ter havido degradação significativa da estrutura neste período.

No sétimo capítulo apresentou-se uma outra aplicação para o sensor biaxial desenvolvido, nomeadamente a monitorização de estruturas esbeltas. Foram realizados ensaios não-destrutivos de onde foram estimadas as frequências próprias de duas torres com 50 m de altura, vulgarmente utilizadas em radiocomunicações. As frequências próprias foram obtidas por acção correspondente à aplicação de impulsos laterais e por meio da excitação ambiente (acção do vento e passagem de comboio). Ficou comprovada a aplicabilidade do sensor óptico neste tipo de estruturas.

No oitavo capítulo descreveu-se o ensaio dinâmico de um reservatório de água elevado, do qual foi possível obter as frequências próprias, longitudinal e transversal, com recurso a um sensor óptico implementado. Os dados recolhidos por meio do sensor óptico foram comparados com os valores obtidos em simultâneo com um sismógrafo. O sensor óptico foi instalado definitivamente no reservatório de modo a que possa ser integrado numa rede de sensores multiplexados que serão interrogados a partir das instalações do edifício do Departamento de Física da Universidade de Aveiro de forma contínua.

No nono capítulo descreveu-se o desenvolvimento e caracterização de um sensor de humidade relativa baseado em redes de Bragg revestidas por um composto híbrido orgânico-inorgânico denominado di-ureasil. O sensor foi caracterizado à temperatura e às variações de humidade relativa num intervalo de 5 a 95 %. Foi realizado um teste de aplicabilidade do sensor. Para isso foram preparados dois sensores de humidade relativa que foram colocados no interior de blocos de betão, estando estes expostos às condições ambientais. A resposta dos sensores foi monitorizada durante cerca de um ano. Os dados de caracterização e o teste de aplicabilidade revelaram que o sensor desenvolvido pode ter aplicação na monitorização do nível de humidade relativa, especialmente nas vizinhanças das armaduras das estruturas de betão ou metálicas de engenharia civil.

10.2 SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

Tendo presente a constante evolução da monitorização estrutural, e por forma a responder às suas necessidades, reconhece-se que os temas estudados e abrangidos por esta tese deverão ser aprofundados e continuados. Neste sentido, e na sequência dos desenvolvimentos contínuos e das necessidades de uma monitorização estrutural adequada e actualizada, apresentam-se de seguida alguns tópicos de sugestão de investigação futura susceptíveis de serem investigados na sequência do trabalho realizado:

- Desenho e implementação de novos sensores ópticos de aceleração, baseados ou não em redes de Bragg gravadas em fibra óptica, com maior sensibilidade e frequência própria mais elevada. A frequência própria está relacionada com a linearidade das medições para frequências mais baixas. Quanto mais alto for o seu valor, mais linear será a resposta do sensor para as frequências mais baixas, no entanto o valor da frequência própria é, normalmente, inversamente proporcional ao valor da sensibilidade do sensor.
- Desenvolvimento de novas formas de encapsulamento de sensores ópticos para aplicações em ambientes hostis, nomeadamente sensores de deslocamento, tensão e aceleração para aplicação em fundações das estruturas de engenharia civil. Nestas aplicações o processo de betonagem é muito agressivo, podendo provocar danos nos sensores se estes não se encontrarem bem acondicionados.

- Desenvolvimento de novos sensores com aplicações em SHM, tais como de pH ou índice de refração. Estes são parâmetros que podem dar indicações sobre o nível de corrosão na armadura das estruturas, com a detecção da carbonatação e níveis de iões cloreto, respectivamente.
- Monitorização remota de estruturas com sensores de fibra óptica. Neste momento está a ser instalada uma rede de fibra óptica na Universidade de Aveiro que liga o edifício do Departamento de Física à ponte pedonal e ao reservatório de água elevado, estruturas estudadas nesta tese. Esta ligação possibilitará a instalação de uma rede de sensores de fibra óptica, multiplexados, que poderão ser interrogados em tempo real a partir dos laboratórios do edifício do Departamento de Física.
- Monitorização de estruturas a longo prazo. Este tópico é essencial num plano de monitorização estrutural eficiente. O sensor de aceleração biaxial implementado passou a fase de testes, estando pronto a ser instalado definitivamente, multiplexado, por exemplo, com um conjunto de sensores de deslocamento e temperatura, em estruturas para uma monitorização mais prolongada no tempo. O controlo do valor das frequências naturais ao longo do tempo permite identificar uma eventual degradação da estrutura e alertar para uma eventual necessidade de intervenção de reabilitação.

Patentes, capítulos de livro, publicações e comunicações resultantes do trabalho desenvolvido

A.1 PATENTES

Paulo André, Ana Maria Rocha, **Paulo Antunes** e André Martins, “Monitor e método para a determinação da ocorrência do efeito de fusível em redes ópticas, baseados em redes de difracção escritas numa fibra óptica”, Número de publicação PT 104875, Data de publicação 14-08-2011.

Paulo André, Ana Maria Rocha, **Paulo Antunes** e André Martins, “Method and monitor to determined the presence of fuse effect in optical networks”, Pub. N.º.: WO/2011/071405, International Application N.º.: PCT/PT2009/000076, Publication Date: 16.06.2011.

Paulo André, **Paulo Antunes**, Humberto Varum, Licínio Ferreira e Marta Sousa, “Monitor e método e dispositivo para a determinação do processo de cura do betão baseado em fibras ópticas de plástico”, PT 105.424, 2010 (Patente Nacional Pendente).

Paulo André, **Paulo Antunes**, Humberto Varum, Licínio Ferreira e Marta Sousa, Method and device for the monitorization of the concrete curing process based in optical fibers, Pct/IB2010/055743, 2010 (Patente Internacional Pendente).

Paulo André, **Paulo Antunes** e Humberto Varum, “Acelerómetro e inclinómetro bidimensional óptico baseado em redes de difracção gravadas em fibras ópticas”, 2011 (Patente Nacional Pendente).

Paulo André, Humberto Varum, **Paulo Antunes**, Edison Pecoraro, Maria Rute André e Luís Dias Carlos, “Sensor óptico baseado em redes de difracção para monitorização do nível de humidade relativa e temperatura em estruturas de engenharia civil”, 2011 (Patente Nacional Pendente).

Maria Rute André, Paulo André, **Paulo Antunes**, Edison Pecoraro, Luis Dias Carlos, Nuno Santos, João Santos e André Barros, “Sensor óptico baseado em fibras fotónicas e materiais híbridos orgânicos-inorgânicos para monitorização do nível de humidade relativa”, 2011 (Patente Nacional Pendente).

A.2 CAPÍTULOS DE LIVRO

Paulo Antunes, Fátima Domingues, Marco Granada e P. S. André, “Mechanical properties of optical fibers”, in Optical Fibers, Editores Yasin Moh, Sulaiman W. Harun e Hamzah Arof, InTech - Open Access Publisher, ISBN: 978-953-307-922-6, 2011 (Aceite para Publicação).

Nélia Alberto, Lúcia Bilro, **Paulo Antunes**, Cátia Leitão, Hugo Lima, Paulo André, Rogério Nogueira e João L. Pinto, “Optical Fiber Technology for eHealthcare”, in Handbook of Research on ICTs for Healthcare and Social Services, Editor Isabel Maria Miranda & Maria Manuela Cruz-Cunha, 2011 (Aceite para Publicação).

Paulo Antunes, H. Lima, Nélia Alberto, Lúcia Bilro, P. Pinto, A. Costa, H. Rodrigues, J. L. Pinto, R. Nogueira, H. Varum e P. S. André, “Optical sensors based on FBG for structural health monitoring”, in New Developments in Sensing Technology for Structural Health Monitoring, Editor Subhas Chandra Mukhopadhyay, Springer-Verlag, ISBN: 978-3-642-21098-3, Junho de 2011.

A.3 PUBLICAÇÕES

Paulo Antunes, Carlos Marques, Humberto Varum e Paulo André, "Biaxial optical accelerometer and high angle inclinometer with temperature and cross axis insensitivity", IEEE Sensors Journal, 2011 (Submetido).

Paulo Antunes, Rui Travanca, Humberto Varum e Paulo André, "Dynamic monitoring and numerical modelling of communication towers with FBG based accelerometers", Journal of Constructional Steel Research, 2011 (Submetido).

L. F. Ferreira, **Paulo Antunes**, F. Domingues, P. A. Silva e P. S. André, "Monitoring of sea bed level changes in nearshore regions using fiber optic sensors", Measurement, 2011 (Submetido).

Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum e Paulo André, "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study", Measurement, 2011 (Submetido).

P. S. André, Humberto Varum, **Paulo Antunes**, Licínio Ferreira e Marta Sousa, "Monitoring of the concrete curing process using plastic optical fibers", Measurement, 2011 (Aceite para publicação).

N. Alberto, L. Carvalho, H. Lima, **Paulo Antunes**, R. Nogueira e J.L. Pinto, "Characterization of different water/powder ratios of dental gypsum using fibre Bragg grating sensors", Dental Materials Journal, vol. 30, nº 5, pp. 700-6, 2011.

Paulo Antunes, A. M. Rocha, H. Lima, H. Varum e P.S. André, "Thin bonding wires temperature measurement using optical fiber sensors", Measurement, vol. 44, Issue 3, pp. 554-558, 2011.

Paulo Antunes, Humberto Varum e Paulo André, "Uniaxial fiber Bragg grating accelerometer system with temperature and cross axis insensitivity", Measurement, vol. 44, Issue 1, pp. 55-59, 2011.

A. M. Rocha, **Paulo Antunes**, F. Domingues, M. Facão e P. S. André, "Detection of fiber fuse effect using FBG sensors", IEEE Sensors Journal, vol. 11, Issue 6, pp.1390-1394, 2011.

H. F. Lima, **Paulo Antunes**, J. L. Pinto e R. N. Nogueira, "Simultaneous measurement of strain and temperature with a single fiber Bragg grating written in a tapered optical fiber", IEEE sensors Journal, vol. 10, Issue 2, pp. 269-273, 2010.

Paulo Antunes, H. F. T. Lima, N. J. Alberto, H. Rodrigues, P. M. F. Pinto, J. L. Pinto, R. N. Nogueira, H. Varum, A. G. Costa e P. S. B. André, "Optical fiber accelerometer system for structural dynamic monitoring", IEEE Sensors Journal, vol. 9, Issue 11, pp. 1346-1354, 2009.

Paulo Antunes, Hugo Lima, Jorge Monteiro e P. S. André, "Elastic constant measurement for standard and photosensitive single mode optical fibres", Microwave and Optical Technology Letters, vol. 50, Number 9, pp. 2467-2469, 2008.

A.4 COMUNICAÇÕES

Fátima Domingues, **Paulo Antunes**, Ana Maria Rocha e Paulo S. André, “Evaluation of the fuse effect in bend loss insensitive fibers”, Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), 4-8 Março, Los Angeles, CA, USA, 2012 (Submetido).

L. Ferreira, **Paulo Antunes**, H. Varum e P.S. André, “Concrete monitoring process based on plastic optical fiber”, International Conference on Physics Science and Technology (ICPST 2011), Dubai, UAE, 28-30 Dezembro, 2011.

C. Leitão, L. Bilro, **Paulo Antunes**, N. Alberto, H. Lima e J. L. Pinto, “Design of Bragg sensors for hemodynamic assessment”, 7th International Conference on Physics Teaching in Engineering Education, Mannheim, Germany, 21 – 23 Setembro, 2011.

L. Bilro, N. Alberto, **Paulo Antunes**, C. Leitão, H. Lima, P. André, R. Nogueira e J. L. Pinto, “Photonics for healthcare”, 6º Congresso Luso Moçambicano de Engenharia e 3º Congresso de Engenharia de Moçambique, Maputo, Moçambique, 29 Agosto – 2 Setembro, CLME’2011_4812R (2pp.), 2011.

Paulo Antunes, Rui Travanca, Humberto Varum e Paulo André, “Dynamic characterization of a radio communication tower with a FBG based accelerometer”, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) Pacific Rim, Sydney, Australia, 28 Agosto - 1 Setembro, 2011.

Paulo Antunes, Humberto Varum e P. S. André, “Dynamic monitorization of structures with optical sensors”, EURO DYN 2011 - Eighth International Conference on Structural Dynamics, Leuven, Belgium, 4-6 Julho, 2011.

Paulo Antunes, Rui Travanca, Humberto Varum e Paulo André, “Dynamic monitoring of a mobile telecommunications tower exposed to natural loading with a FBG biaxial accelerometer”, 16th Opto-Electronics and Communications Conference – OECC2011, Kaohsiung, Taiwan, 4-8 Julho, 2011.

Paulo Antunes, Rui Travanca, Humberto Varum e Paulo André, “Dynamic monitoring of a mobile telecommunications tower with a bi-axial optical FBG accelerometer”, International Conference on Applications of Optics and Photonics – AOP2011, Braga, Portugal, 3 – 7 Maio, 2011.

Paulo Antunes, Humberto Varum e Paulo André, “Optical sensors for structural health monitoring in civil engineering structures”, Research day, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 8 Junho, 2011.

Nélia J. Alberto, Carlos A. Marques, **Paulo Antunes**, João L. Pinto e Rogério N. Nogueira, “Three parameters simultaneous measurement with a single TFBG”, OFS-21: 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Ottawa, Canada, 15-19 Maio, 2011.

Paulo Antunes, F. Domingues, L. F. Ferreira, P. A. Silva e P. S. André, “Monitorização das variações da topografia de uma praia com sensores de fibra óptica”, MEC2011 - Conferência sobre Morfodinâmica Estuarina e Costeira, LNEC, Lisboa, Portugal, 3-4 Fevereiro, 2011.

Paulo Antunes, Humberto Varum e Paulo André, “Optical FBG sensors for static structural health monitoring”, EASEC12 - Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction, Hong Kong, 26-28 Janeiro, 2011.

Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum e Paulo André, “Static and dynamic structural monitoring based on optical fiber sensors”, 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Munich, Germany, 27 Junho - 1 Julho, 2010.

Ana M. Rocha, **Paulo Antunes**, F. Domingues, M. Facão e P.S. André, “Configuration for detecting the fiber fuse propagation using a FBG sensor”, 12th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Munich, Germany, 27 Junho - 1 Julho, 2010.

Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum e Paulo André, “Health monitoring of civil engineering infrastructures with optical fiber sensors”, SEON2010, VIII Symposium on Enabling Optical Networks and Sensors, Porto, Portugal, 25 Junho, 2010.

P. S. André, M. Facão, A. M. Rocha, **Paulo Antunes** e A. Martins, "Evaluation of the fuse effect propagation in networks infrastructures with different types of fibers", Optical Fiber Communication Conference, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper JWA10, San Diego, USA, 21-25 Março, 2010.

Paulo Antunes, Hugo Lima, Pedro Pinto, Humberto Varum e Paulo André, “Sensor óptico para monitorização do comportamento dinâmico de estruturas”, Engenharia'2009 – Inovação e Desenvolvimento, Covilhã, Portugal, 25-27 Novembro, 2009.

Luís Ferreira, **Paulo Antunes**, Fátima Domingues, Juana Fortes, Paulo Silva, Rogério Nogueira, João Lemos Pinto e Paulo André, “Monitorization of sea sand transport in coastal areas using optical fiber sensors”, IEEE Sensors 2009, Christchurch, New Zealand, pp. 146-150, 25-28 Outubro, 2009.

H. F. Lima, **Paulo Antunes**, R. N. Nogueira e J. L. Pinto, “Temperature and strain discrimination using a single fibre Bragg grating written in a tapered optical fibre”, Twentieth International Conference on Optical Fibre Sensors, Edinburgh, United Kingdom, 5-9 Outubro, 2009.

Hugo F. T. Lima, **Paulo Antunes**, Luís Silva, Rogério N. Nogueira e João L. Pinto, “Determinação dos tempos de presa de argamassas em diferentes condições de cura usando sensores de fibra óptica”, Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, 2-4 Setembro, 2008.

Paulo Antunes, H.F.T. Lima, I. Abe, H. Varum, J.L. Pinto e P.S.B. André, “Sistema óptico de baixo custo para monitorização dinâmica de estruturas”, Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo, Moçambique, 2-4 Setembro, 2008.

